



Mestrado em Engenharia Civil

---

# **Deterioração do Betão – Técnicas de Avaliação e Prevenção**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Civil  
Especialização em Construção Urbana

**Autor**

**Isabela Soraia Costa Gomes**

**Orientador**

**Prof. Doutor Ricardo Nuno Francisco do Carmo**

Professor do Departamento de Engenharia Civil  
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra, dezembro, 2016**



*“Não se escreve por se querer dizer alguma coisa, escreve-se porque se tem alguma coisa  
para dizer”*  
**Scott Fitzgerald**



## AGRADECIMENTOS

Esta dissertação foi possível de realizar graças à ajuda, apoio, compreensão e motivação de alguns intervenientes a quem muito estimo e expresso os meus agradecimentos.

Ao Professor Doutor Ricardo Nuno Francisco do Carmo, pela orientação científica desta dissertação, pela partilha de conhecimentos, por todas as recomendações na elaboração deste trabalho, pela disponibilidade sempre evidenciada, e pelo apoio e amizade demonstrada.

Aos meus colegas e amigos, Cátia Lourenço, Eliana Soldado, João Silva e Rui Ismael, pela informação facultada e pela disponibilidade relativamente à minha presença nos ensaios laboratoriais dos respetivos trabalhos. Ao meu colega e amigo Tiago Carneiro, pela partilha de informação que tanto me ajudou.

À minha amiga Daniela Antunes, pelo apoio, partilha de conhecimento, e amizade que muito prezo, à minha amiga Marisa Matias, pela motivação, companheirismo e partilha de sentimentos, à minha amiga Sofia Trovisco que apesar da distância permanece a amizade e à minha mais recente amiga Isabel Dias, pela alegria, pelo entusiasmo e confiança que sempre me transmitiu.

Aos meus amigos, Emanuel Sousa, Daniel Maio Narciso e Sérgio Gonçalves, pela disponibilidade na revisão, aconselhamento, e partilha de conhecimentos.

E a todos os outros meus amigos, que não consigo estar a citar, e que pelo simples facto de o serem, e de o serem bem, contribuem em muito para as minhas conquistas.

Por fim, um agradecimento especial a meus pais, por serem os pais maravilhosos que são, por sempre acreditarem que conseguiria superar mais esta etapa e pelo simples facto de nunca me deixarem desistir dela, e claro, por todo o apoio financeiro.

E claro, e porque sem a minha pessoa nada disto seria possível, pela persistência, esforço, e pela grande conquista deste trabalho.

*Isabela Soraia Costa Gomes*

Coimbra, dezembro de 2016



## RESUMO

Desde o século passado que o betão tem sido um dos materiais mais usados na construção em todo o mundo. Devido à sua fácil utilização e versatilidade para assumir várias formas, este material permitiu a construção de edifícios, pontes, aquedutos, entre outros. Com estas características não é difícil de perceber que foi utilizado em massa, e por isso, está muito presente na vida de todos nós. Com o passar dos anos e com a utilização, estas construções começam a sofrer o desgaste natural relativo à idade e começam a necessitar de algumas intervenções. Contudo, apenas nos últimos anos se tem dado realmente importância à temática da reabilitação.

Com o passar do tempo e com a exposição a agentes agressivos, as construções ficam mais vulneráveis e começam a dar os primeiros sinais de deterioração. Se as patologias não forem identificadas a tempo podem provocar graves problemas nas estruturas. Essa tarefa deve ser realizada por técnicos especializados, com bons conhecimentos a nível estrutural e a nível patológico, que consigam identificar as causas associadas a cada dano. Os danos que se verificam nas estruturas podem ser de diversos tipos, como por exemplo biológicos, físicos, químicos ou mecânicos, e terem diversas causas, entre elas, os erros de projeto, os de construção, uma inadequada manutenção ou até mesmo uma incorreta utilização.

Uma análise deste tipo está normalmente dividida em várias fases, cada uma delas com o seu grau de importância. Começa pela inspeção visual como forma de avaliação, passando pela recolha de dados, acabando na fase de diagnóstico e prognóstico. De referir que nem sempre é possível determinar os problemas estruturais apenas com uma simples inspeção visual, e que a fase de recolha de dados é muitas vezes complementada com ensaios no local e/ou ensaios laboratoriais.

Posto isto, esta dissertação não é mais que uma recolha de informação relativa às patologias que se manifestam nas construções em betão e uma análise das suas causas. Procurou-se apresentar de forma sistemática e organizada todas as fases correspondentes a uma avaliação de uma estrutura de betão, dando-se realce a uma série de ensaios *in situ*, e em laboratório, imprescindíveis, e compatíveis com a necessidade de cada caso. Por fim, apresenta-se um conjunto de casos reais onde as técnicas de inspeção e diagnóstico foram fundamentais para a reabilitação da estrutura.

## Palavras – Chave

Estruturas; deterioração; durabilidade; betão; patologias; inspeção; diagnóstico; ensaios *in situ*; ensaios laboratoriais.





## ABSTRACT

Since the last century that concrete has been one of the major building materials used in the world. Due to its easy way to use and its versatility to assume several shapes, this material allowed the construction of buildings, bridges, aqueducts, among others. With these technical features it is not difficult to realize that it was used in bulk, and so, it is very present in the lives of all of us. Over the years and with its use, these constructions begin to suffer the natural wear as consequence of aging and they begin to require some interventions. However, it is only in recent years that rehabilitation has really become important.

Over time and with exposure to aggressive agents, buildings become more vulnerable and begin to show the first signs of deterioration. If the pathologies are not identified in time they can cause serious problems in the structures. This task must be performed by specialized technicians, with good structural and pathological knowledge, who can identify the causes associated with each damage. Damage on structures can be of a variety of types, such as biological, physical, chemical or mechanical, and may have several causes, including design errors, construction errors, improper maintenance or even improper use.

An analysis of this type usually is divided in several phases, each with its degree of importance. It begins by visual inspection as a form of evaluation, through the collection of data, ending in the diagnostic and prognostic phase. It should be noted that it is not always possible to determine the structural problems only with a simple visual inspection, and the data collection phase is often complemented by in situ tests and/or laboratory tests.

Therefore, this dissertation is no more than a collection of information about pathologies in concrete constructions and an analysis of their causes. It tried to present in systematic and organized way all the phases corresponding to an evaluation of a concrete structure, emphasizing a series of in situ tests, and laboratory tests, essential, and compatible with the necessity of each case. Finally, a set of real cases is presented where the inspection and diagnostic techniques were fundamental for the rehabilitation of the structure.

## Key – Words

Structures; deterioration; durability; concrete; pathologies; inspection; diagnosis; in situ testes; laboratory tests.



# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO .....	1
1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIAS DE TRABALHO .....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. PATOLOGIAS NAS ESTRUTURAS DE BETÃO.....</b>	<b>5</b>
2.1 ENQUADRAMENTO .....	5
2.2 BREVE ABORDAGEM AO MATERIAL: BETÃO ARMADO .....	6
2.3 FATORES DE DEGRADAÇÃO .....	10
2.3.1 Danos Biológicos.....	10
2.3.2 Danos Físicos .....	11
2.3.3 Danos Químicos .....	14
2.3.4 Danos Mecânicos .....	19
2.4 ORIGEM DOS FATORES DE DEGRADAÇÃO .....	21
2.4.1 Causas Diretas .....	21
2.4.2 Causas Indiretas .....	23
2.5 QUAIS E EM QUE FASE SÃO DETETADOS DANOS NAS ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO .....	23
<b>3. PRINCÍPIOS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO .....</b>	<b>27</b>
3.1 ENQUADRAMENTO .....	27
3.2 OBSERVAÇÃO DOS DANOS .....	27
3.3 RECOLHA DE DADOS.....	27
3.4 MÉTODOS AUXILIARES DE DIAGNÓSTICO .....	29
3.4.1 Inspeção Visual .....	29
3.4.2 Ensaios Não destrutivos e semi – destrutivos.....	30
3.4.3 Ensaios Destrutivos .....	35
3.4.4 Monitorização.....	36
3.5 ANÁLISE DE DADOS E DIAGNÓSTICO.....	37
3.6 FASE DE PROGNÓSTICO.....	38
3.7 FICHA DE RECOLHA DE DADOS .....	38
<b>4. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO EM ESTRUTURAS DE BETÃO .....</b>	<b>43</b>
4.1 ENQUADRAMENTO .....	43
4.2 ENSAIOS IN SITU .....	43
4.2.1 Ensaios Não Destrutivos e Semi Destrutivos.....	46
4.2.1.1 Ensaio do Esclerómetro.....	46
4.2.1.2 Técnicas cuja base é a Teoria da Propagação de Ondas .....	50
4.2.1.3 Ensaio para determinar a permeabilidade do betão .....	58
4.2.1.4 Ensaio da determinação do teor de cloretos no betão .....	61
4.2.1.5 Ensaio para a deteção de armaduras, análise do seu diâmetro e medição do recobrimento.....	63
4.2.1.6 Ensaio para a determinação da carbonatação no betão .....	66
4.2.1.7 Ensaio de aderência por tração – Pull Off.....	68

4.2.1.8	Ensaio de medição de humidade superficial .....	70
4.3	ENSAIOS LABORATORIAIS .....	72
4.3.1	<i>Ensaio de arranque Pull-Out</i> .....	72
4.3.2	<i>Ensaio de Resistência Mecânica à Tração por Flexão</i> .....	75
4.3.3	<i>Ensaio de Resistência à compressão</i> .....	76
4.3.4	<i>Ensaio de capilaridade</i> .....	78
4.3.5	<i>Ensaio de carbonatação acelerada</i> .....	79
<b>5.</b>	<b>CASOS DE ESTUDO</b> .....	<b>81</b>
5.1	ENQUADRAMENTO .....	81
5.2	ENSAIOS LABORATORIAIS REALIZADOS NO ÂMBITO DE UM ESTUDO DE ARGAMASSAS E BETÕES COM ADIÇÃO DE NANO-PARTÍCULAS .....	81
5.3	CASOS REAIS DE ENSAIOS IN SITU .....	88
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>97</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	97
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	97
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>99</b>
	<b>REFERÊNCIAS NORMATIVAS</b> .....	<b>105</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Agregados rolados e agregados britados, respetivamente.....	6
Figura 2.2 – Realização de uma amassadura em laboratório. ....	7
Figura 2.3 – Procedimento para a formulação de betões [1]. ....	8
Figura 2.4 – Exemplo de uma viga de betão armado [3]. ....	9
Figura 2.5 – Fungo em parede [5]. ....	10
Figura 2.7 – Delaminação da zona superficial do betão causada pela ação do gelo/desgelo [8]. .....	11
Figura 2.8 – Humidade que se infiltra no edifício por capilaridade [9]. ....	12
Figura 2.9 – Humidade absorvida por capilaridade e que provocou criptoflorescências [10]. .....	13
Figura 2.10 – Humidade nas paredes superiores originada por condensação [11]. ....	14
Figura 2.11 – Resultado da erosão numa peça de betão [8]. ....	14
Figura 2.12 – Oxidação das armaduras [13]. ....	15
Figura 2.13 – Corrosão das armaduras em viga de betão armado [15]. ....	16
Figura 2.14 – Processos ocorridos na corrosão [2]. ....	17
Figura 2.15 – Parede de betão armado onde são visíveis eflorescências [17]. ....	19
Figura 2.16 – Criptoflorescência [18]. ....	19
Figura 2.17 – Fenda superficial no revestimento de argamassa de uma parede. ....	20
Figura 2.18 – Fissura em laje de betão armado [19]. ....	21
Figura 3.1 – Inspeção visual [27]. ....	30
Figura 3.2 – Ensaio de carga com equipamento específico em laje [29]. ....	32
Figura 3.3 – Esquema exemplificativo do ensaio de ultra sons [30]. ....	33
Figura 3.4 – Detecção das armaduras com a utilização do pacómetro [32]. ....	34
Figura 3.5 – Ensaio destrutivo – carotagem. [33]. ....	36
Figura 4.1 – Vários formas de agrupar os ensaios <i>in situ</i> [adaptado de [37]]. ....	45
Figura 4.2 – Constituição do esclerómetro do tipo Schmidt [2]. ....	46
Figura 4.3 – Funcionamento do esclerómetro tipo Schmidt [39]. ....	47
Figura 4.4 – Bigorna de calibração de aço do esclerómetro de Schmidt [41]. Calibração do esclerómetro [42]. ....	48
Figura 4.5 – Ensaio com o esclerómetro de Schmid, afastamento entre zonas de impacto [43, 44]. ....	49
Figura 4.6 – Aparelho utilizado no ensaio de ultra sons [47]. ....	51
Figura 4.7 - Esquema de simulação da calibração do equipamento [49]. ....	52
Figura 4.8 – Ensaio de Ultra sons [50]. ....	52
Figura 4.9 – Resultados obtidos de um ensaio de Ultra sons [47]. ....	53
Figura 4.10 – Método de transmissão direta no ensaio de Ultra-sons [45]. ....	54
Figura 4.11 – Método de transmissão semi direta do ensaio de Ultra-sons [45]. ....	54
Figura 4.12 - Método de transmissão indireta ou superficial do ensaio de Ultra-sons [45]. ....	54
Figura 4.13 – Equipamento utilizado no ensaio Impacto Eco [51]. ....	56
Figura 4.14 – Ensaio de impacto eco realizado num muro de suporte e no interior de uma ponte, à esquerda e direita, respetivamente [53]. ....	57
Figura 4.15 – Ensaio para medição da profundidade das fendas [45]. ....	58

Figura 4.16 – Equipamento utilizado no ensaio de permeabilidade aparente do ar e água [54].	59
Figura 4.17 – Ensaio de permeabilidade aparente do betão ao ar [45]	60
Figura 4.18 - Ensaio de permeabilidade aparente do betão à água [45]	60
Figura 4.19 – Penetração de cloretos no betão em estruturas em contacto direto com a água. [56].	61
Figura 4.20 – Equipamento utilizado para a determinação do teor de cloretos no betão [45].	62
Figura 4.21 – Pacómetro [58].	64
Figura 4.22 – Equipamento de deteção e medição das armaduras.	64
Figura 4.23 – Utilização do pacómetro no ensaio [59].	65
Figura 2.24 – Deteção e marcação das armaduras na peça de betão armado [58].	66
Figura 4.25 – Colocação da solução de fenolftaleína na perfuração [61].	67
Figura 4.26 – Medição da profundidade de carbonatação no betão armado [62].	68
Figura 4.27 – Ensaio de aderência por tração ou ensaio Pull –Off [66].	69
Figura 4.28 – Equipamento para o ensaio Pull – Off [67].	69
Figura 4.29 – Mecânica de aplicação das forças no ensaio Pull-Off [39].	70
Figura 4.30 – Humidímetro para medição de humidade em paredes de betão [70].	71
Figura 4.31 – Equipamento utilizado no ensaio Pull- Out [73].	72
Figura 4.32 – Dispositivos de fixação ao betão, depois da realização do ensaio [72].	73
Figura 4.33- Ensaio de arranque – Pull Out com sistema hidráulico manual [72].	74
Figura 4.34 – Fases do ensaio de Pull-Out: 1) Colocação dos discos de fixação nos provetes de betão; 2)Aspeto do provete depois de retirada a cofragem; 3) Aplicação da carga no provete de betão; 4) Rotura do provete de betão [74].	74
Figura 4.35 – Equipamento de ensaio de tração por flexão, em argamassas à esquerda, em betões, à direita [75].	75
Figura 4. 36 – Esquema do ensaio de tração por flexão em argamassas [75].	76
Figura 4.37 – Ensaio de compressão em provetes de argamassa, à esquerda, e em provetes de betão, à direita [75].	77
Figura 4.38 – Esquema do ensaio de compressão num provete de argamassa.	78
Figura 4.39 – Ensaio de absorção de água por capilaridade. Medição da absorção de água [75].	79
Figura 4.40 – Preparação dos provetes, câmara para o ensaio de carbonatação acelerada e medição da profundidade de carbonatação [75].	80
Figura 5.1 – Ensaio de tração por flexão em provetes de argamassa [75].	82
Figura 5.2 – Ensaio de resistência à tração em provetes de betão [75].	83
Figura 5.3 – Ensaio de compressão em provetes de argamassa [75].	84
Figura 5.4 – Ensaio de compressão em provetes de betão [75].	85
Figura 5.5 – Provetes de betão sujeitos ao ensaio de carbonatação acelerada [75].	87
Figura 5.6 - Ponte sobre o rio Jaguari [76].	88
Figura 5.7 – Ensaio do pacómetro [76].	88
Figura 5.8 – Esquema com a localização das armaduras no ensaio do pacómetro (adaptado de [76]).	89
Figura 5.9 – Ensaio do esclerómetro e esquema com a localização dos pontos onde foram realizados os ensaios (adaptado de [76]).	90
Figura 5.10 – Ensaio de ultra sons e diagrama exemplificativo do elemento ensaiado (adaptado de [76]).	91
Figura 5.11 – Resultado do ensaio de carbonatação (76)	92
Figura 5.12 – Edifício em estado devoluto na cidade de Lisboa (adaptado de [77]).	93
Figura 5.13 – Ensaio do esclerómetro. Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios (adaptado de [77]).	94
Figura 5.14 – Ensaio de carbonatação in situ [77].	95

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo das ações atuantes nas estruturas, as causas e os danos associados [adaptado de [20]].....	22
Tabela 5.1 – Valores do ensaio de resistência à tração das misturas de referência (adaptado de [75]). .....	82
Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de resistência à tração em provetes de betão (adaptado de [75]). .....	83
Tabela 5.3 - Valores do ensaio de resistência à compressão das misturas de referência (adaptado de [75]). .....	85
Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão em provetes de betão (adaptado de [75]). .....	86
Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de absorção por capilaridade (adaptado de [75]). .....	86
Tabela 5.6 – Resultados do ensaio de carbonatação acelerada (adaptado de [75]). .....	87
Tabela 5.7 – Resultados do recobrimento das armaduras (adaptado de [76]). .....	89
Tabela 5.8 – Resultados obtidos do ensaio do esclerómetro (adaptado de [76]). .....	90
Tabela 5.9 – Resultados do ensaio de Ultra Sons (adaptado de [76]). .....	91
Tabela 5.10 – Critérios de avaliação da qualidade do betão (adaptado de [76]). .....	92
Tabela 5.11 – Resultados do ensaio de carbonatação (adaptado de [76]). .....	93
Tabela 5.12 – Resultados obtidos no ensaio do esclerómetro (adaptado de [77]). .....	95





## **SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS**

$\text{Ca(OH)}_2$  – Hidróxido de Cálcio

$\text{CaCO}_3$  – Carbonato de Cálcio

$\text{CO}_2$  – Dióxido de Carbono

EN – Norma Europeia

Fe – Ferro

$\text{Fe (OH)}_2$  – Hidróxido de Ferro

$\text{H}_2\text{O}$  – Água

NP – Norma Portuguesa

$\text{O}_2$  – Oxigénio

$\text{OH}^-$  - Iões Hidroxilo

pH – Potencial de Hidrogénio



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

A partir de meados do passado século, a utilização do betão esteve presente na maior parte das construções feitas no nosso país. O facto do betão armado ser fácil de utilizar, versátil, ter qualidade em termos de resistência e talvez devido à falta de conhecimento de outros materiais, são alguns dos fatores que conduziram ao uso generalizado deste material. Todas estas características e outras levaram técnicos a considera-lo um material adequado para a construção de estruturas, valorizando-o talvez em demasiado.

Mas como todos os materiais, ao longo tempo, o betão vai envelhecer e perder algumas das suas características. Uma deficitária manutenção e utilização contribuem em muito para diminuir a vida útil das estruturas. Isso verifica-se hoje em dia, com a maior parte das construções antigas degradadas que põe em causa não só a segurança dos utilizadores, como também o bom aspeto das construções. Para que se trave esta degradação é necessário mudar mentalidades, e elaborar um plano eficiente de manutenção para cada estrutura, de forma a prevenir estes acontecimentos. Aos primeiros sintomas patológicos encontrados nas construções, normalmente visualizados por utilizadores, devem ser chamados técnicos ao local para fazer uma inspeção detalhada acerca da patologia encontrada.

Como já foi referido, com o passar dos anos, e com a exposição permanente das estruturas de betão a agentes de deterioração, como a água, o vento, o dióxido de carbono, entre outros, associada a uma manutenção deficitária, é plausível a formação de danos. Estes danos podem ser de diversos tipos como por exemplo, biológicos, físicos, químicos ou até mesmo mecânicos. Há ainda outras causas para as patologias das estruturas, erros cometidos na fase de projeto, bem como, os erros cometidos na fase de produção e construção em obra.

Para o início de trabalhos de avaliação e prevenção nas estruturas de betão, o técnico especializado necessita, numa primeira abordagem, da recolha de toda a informação documentada acerca da construção em análise. Seguidamente, inicia uma inspeção visual, na qual fará uma observação detalhada dos problemas que lhe foram reportados. Caso, consiga tirar conclusões dessa análise, passa diretamente para uma fase de prognóstico em que elaborará uma solução eficaz para o dano visualizado. Mas caso isso não aconteça, e este não consiga tirar conclusões apenas com uma inspeção visual, deve recorrer a outros meios, nomeadamente à elaboração de ensaios que complementem a informação recolhida até então. Consoante o problema detetado, o técnico vai escolher o ensaio que mais se adequa a cada caso. Existem três tipos de ensaios: os ensaios não destrutivos, mais frequentemente utilizados; os ensaios semi destrutivos; e os ensaios destrutivos. Estes podem ser elaborados *in situ*, ou feitos laboratorialmente, dependendo do objetivo que se pretende. Toda esta temática será abordada no presente documento escrito.

## 1.2 Objetivos e Metodologias de Trabalho

O presente documento baseia-se fundamentalmente na recolha de informação na área das patologias das construções em betão e dos ensaios que podem ser realizados para complementar a caracterização do estado atual da estrutura. Embora este tema já seja recorrente, a verdade é que a informação encontrada é sempre muito focada num ou noutro conceito em particular. A presente dissertação pretende ser um pouco diferente, procura dar uma visão mais generalizada acerca da ciência das patologias e das suas formas de controlo e deteção.

O presente documento pretende fornecer informações com os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os processos patológicos ocorridos nas construções, fornecendo informações sobre os danos que podem ser encontrados, os agentes de deterioração das estruturas, as causas associadas a esses mesmos danos
- Facilitar o reconhecimento dessas patologias apresentando imagens reais, com o objetivo de alertar para uma correta utilização e uma manutenção preventiva das estruturas.
- Descrever de forma organizada as metodologias utilizadas pelos técnicos na fase de diagnóstico assim como todo o processo, desde a simples visualização do dano até à fase em que se formaliza a solução de reabilitação.
- Descrever alguns ensaios *in situ* e em laboratório que são úteis para caracterizar o estado da estrutura e assim complementar a informação recolhida na fase da inspeção visual.
- Apresentar casos reais com o objetivo de sensibilizar os utilizadores e técnicos para o problema da deterioração das estruturas de betão.

## 1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação é constituída por seis capítulos. Nestes estão incluídos uma introdução, uma conclusão e referências bibliográficas. Mais pormenorizadamente segue-se a explicação do conteúdo de cada capítulo.

Neste primeiro capítulo é realizado o enquadramento da tese, onde se descrevem todos os aspetos gerais. São enumerados ainda os objetivos do trabalho, bem como a metodologia utilizada para atingi-los. Por fim, é desenvolvida uma descrição breve e objetiva acerca da organização do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada realizado um resumo do estado da arte sobre as patologias nas estruturas. Todos os processos patológicos que afetam as estruturas de betão, os seus agentes de degradação, os danos causados nas construções vão ser descritos e ilustrados, numa visão

geral e abrangente. São ainda citadas e analisadas as causas que estão na origem de muitos dos problemas que afetam as construções.

O Capítulo 3 descreve as etapas necessárias numa ação de inspeção e diagnóstico, desde a simples e inicial inspeção visual da estrutura, passando pela sempre necessária recolha de dados, e análise dos mesmos, até à fase de prognóstico, etapa final onde se apresenta a solução de reabilitação da estrutura de betão.

No Capítulo 4 resumem-se as metodologias utilizadas em alguns dos ensaios utilizados na fase de recolha de dados. Realça-se a informação obtida em cada tipo de ensaio e como podem ser úteis em cada caso. Descrevem-se todos os tipos de ensaios: os ensaios não destrutivos e os semi destrutivos, sendo que uns são realizados *in situ* e outros em laboratório, como se verificará mais à frente.

O Capítulo 5 apresenta, de forma resumida, alguns resultados e ilustrações de trabalhos de investigação, no âmbito de outros de estudos, em que foram utilizados os ensaios descritos no capítulo anterior.

No último capítulo, são descritas as conclusões finais de toda a informação recolhida acerca das técnicas de avaliação e prevenção nas estruturas de betão. São ainda sugeridos alguns temas para trabalhos futuros que podem complementar este documento.

Por fim, citam-se todas as referências bibliográficas que serviram de base a todo este trabalho.



## 2. PATOLOGIAS NAS ESTRUTURAS DE BETÃO

### 2.1 Enquadramento

Ao longo do último século, o betão armado tem tido um papel relevante na construção. Milhares e milhares de toneladas de betão têm sido utilizados na construção de novas edificações. A construção massiva é um sinal do crescimento da população e geralmente associado ao crescimento da economia. A necessidade em cumprir prazos, ou na maior parte das vezes, a realização apressada das tarefas, potencia erros cruciais, quer na fase de projeto, quer numa fase mais avançada, a de execução. Na maioria dos casos esses enganos não são detetados, manifestando-se então mais tarde, normalmente na fase de utilização da obra.

E se nas construções mais recentes há patologias, então nas mais antigas estas são ainda mais frequentes. Anos e anos de exposição a agentes de degradação, juntamente com uma manutenção deficitária e acrescentando os tais erros de construção, formam um conjunto de fatores propícios ao desenvolvimento de danos na estrutura. Uma vez detetados, e para a salvaguarda das estruturas de betão armado, a nível de segurança, estes devem ser analisados a fim da obtenção de uma solução para a sua recuperação total. Para isso, são elaborados ensaios, cuja escolha do tipo está ao encargo do técnico especializado, consoante as necessidades específicas da informação ou característica que se pretende determinar.

Solucionar o problema patológico é fundamental para garantir o bom funcionamento das estruturas e para isso são necessários bons conhecimentos e experiência por parte do técnico responsável pela análise. Ter um bom conhecimento do comportamento dos materiais que são utilizados nas estruturas é uma mais-valia nesta análise.

O betão armado pode ter características distintas, nomeadamente no que diz respeito à resistência, módulo elasticidade e durabilidade, pois é um material heterogéneo composto por diversos outros materiais, como agregados de diferentes dimensões, ligantes como o cimento, adjuvantes e água, cujas quantidades utilizadas na sua elaboração variam consoante o objetivo de aplicação do mesmo. Conhecer estas características é essencial na análise de uma estrutura em degradação mas é também necessário ter um conhecimento aprofundado de todos os mecanismos de degradação, ou seja, de todos os agentes que ao estarem em contacto com as estruturas de betão armado podem, de alguma forma, contribuir para a sua debilidade, a curto ou longo prazo. É fundamental saber como esses agentes irão reagir com o betão e o que resultará dessa reação.

Neste capítulo, para além de ser abordado o material betão armado, desde todos os seus componentes até à sua elaboração, é dada grande ênfase aos fatores que contribuem para a degradação do mesmo, bem como a origem de todos esses danos.

## 2.2 Breve abordagem ao material: betão armado

O betão armado tornou-se num dos materiais mais usados na construção o século XX. Sendo um material que pode adquirir diferentes formas é utilizado em pontes e viadutos bem como nas edificações, como elemento estrutural, elementos de fachada ou mesmo como elementos pré fabricados. Recorre-se também a este material quando se pretende fazer pavimentos rodoviários rígidos.

O betão armado é bastante heterogéneo e consiste na junção de betão com armaduras de aço. Antes de abordar o material como um todo, far-se-á uma abordagem dos materiais separadamente.

- **Betão simples**

O betão simples consiste na simbiose de uma parte sólida, constituída por agregados, cimento, e possíveis adições, e uma parte fluida tendo como principal elemento a água, mas que contém também alguns vazios e os adjuvantes [1]. Relativamente ao material granular, mais propriamente os agregados, pode dizer-se que os de origem natural são os mais utilizados, havendo também agregados fabricados, como por exemplo, os agregados de argila expandida. Apresentam-se em grãos mais ou menos arredondados, os chamados agregados rolados ou numa forma mais irregular, tendo esses a designação de agregados britados. A Figura 2.1 ilustra o aspeto visual de alguns agregados rolados, do lado esquerdo, e agregados britados, do lado direito.



Figura 2.1 – Agregados rolados e agregados britados, respetivamente.

Ainda no que respeita à parte sólida da mistura tem-se o cimento, o principal ligante hidráulico utilizado, e é graças a ele que o betão adquire toda a resistência. Existem vários tipos e classes de cimentos, que são usados consoante o desempenho que se pretende que a estrutura obtenha. O conhecimento de todas as suas características torna-se extremamente importante aquando da decisão da utilização de um ou outro tipo de cimento, pois existem cerca de 33 tipos. Essas particularidades vêm descritas nas normas e nas fichas técnicas normalmente cedidas pelas cimenteiras [1].



Para melhorar as características do betão, como por exemplo, para que este obtenha maior desempenho, podem ser colocadas adições aquando da amassadura. A cor do betão também pode ser alterada pela adição destes componentes. Contudo, deve ter-se em atenção as quantidades adicionadas pois podem comprometer certas propriedades do betão, tal como, o tempo de presa a curto prazo, ou a durabilidade da estrutura a longo prazo. Existem adições de dois tipos, sendo que as adições do tipo I são muito semelhantes a certos agregados no que ao tamanho diz respeito, e exemplo disso são os pigmentos e as farinhas calcárias. Já as adições de tipo II podem dividir-se em adições hidráulicas latentes e adições pozolânicas [1].

Uma vez que já foram referidos todos os possíveis componentes da parte sólida da mistura, resta citar os elementos constituintes da parte fluida. A água é o mais importante deles, pois é essencial para a realização de todas as reações de hidratação do cimento. Claro que, tem de ser utilizada nas quantidades certas. Os adjuvantes têm igualmente muita utilidade, nomeadamente, para alterar algumas características do betão. Estas modificações fazem-se notar, tanto no betão em estado fresco como em estado endurecido. São utilizados em quantidades muito pequenas mas ajudam a tornar o processo de presa e/ou endurecimento mais rápido ou mais lento, contribuem para uma maior trabalhabilidade da pasta, atuam na defesa contra alguns agentes de degradação e podem ser usados para aumentar a resistência do betão propriamente dito [1].

Depois de conhecidos todos os elementos que fazem parte integrante da mistura que dará origem ao betão, há que saber usá-los nas quantidades adequadas. Para isso, será necessária a quantificação de todos os constituintes. Seguidamente a essa tarefa é realizada a mistura, numa primeira fase em laboratório, em pequenas quantidades, a fim de realizar todos os ensaios inerentes, por exemplo, para a determinação da resistência à compressão e tração, da consistência, do módulo de elasticidade e do desempenho em termos de durabilidade (Fig. 2.2). Só numa segunda fase é que o betão será produzido numa central de betão para depois seguir para obra (Fig. 2.3).



Figura 2.2 – Realização de uma amassadura em laboratório.

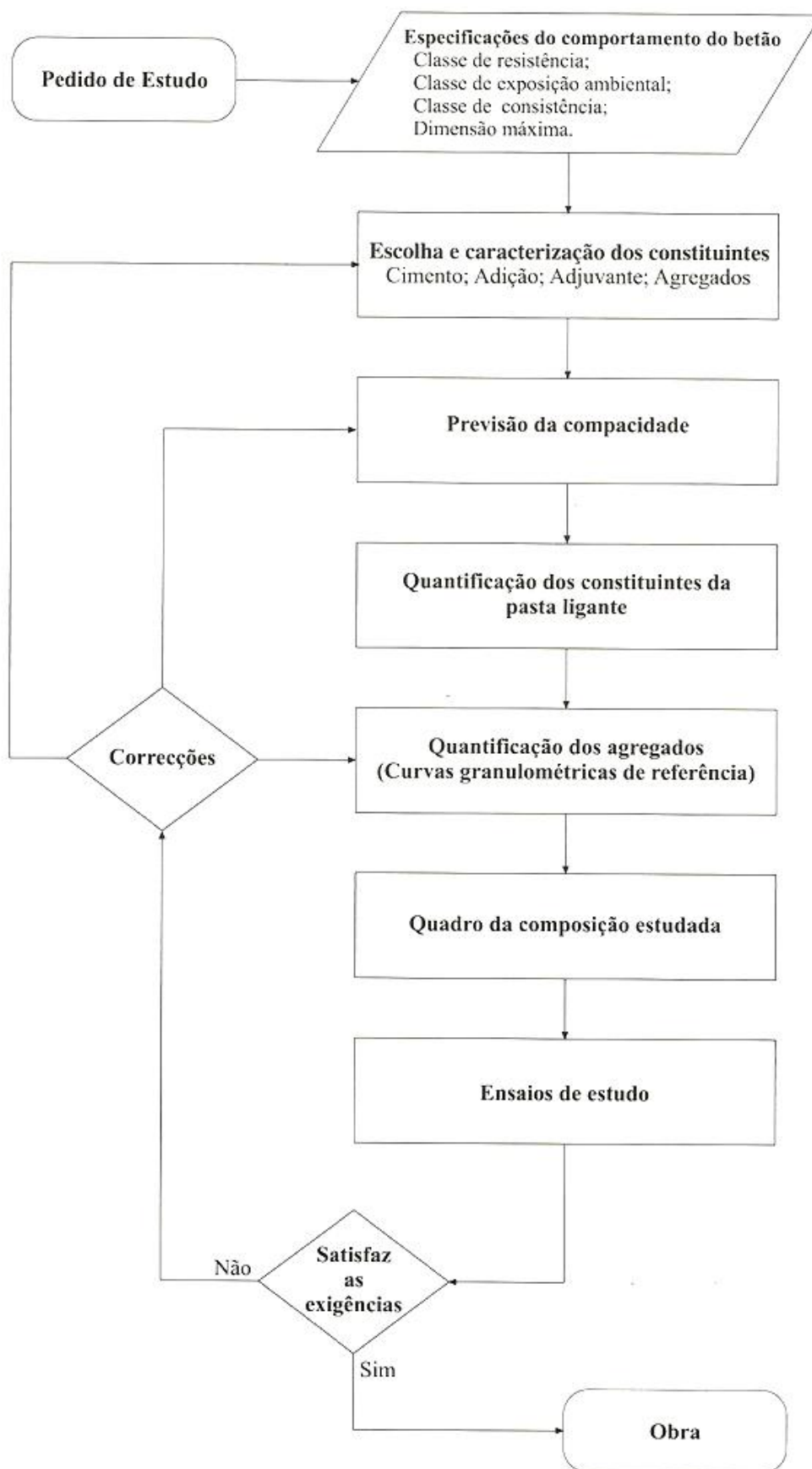


Figura 2.3 – Procedimento para a formulação de betões [1].

- **Betão armado**

O betão armado não é mais que o resultado da incorporação de aço no betão (Fig. 2.4). O betão embora tenha uma boa resistência à compressão, resiste muito pouco à tração. Como tal, a introdução de armaduras de aço é uma forma eficaz de compensar essa desvantagem. Assim, a estrutura passa a conseguir resistir a esforço de flexão, torção e esforço transversal. O betão também é uma mais-valia para o aço, pois funciona como uma capa protetora e evita que este, exposto aos agentes de deterioração, se degrade com o passar do tempo [2].

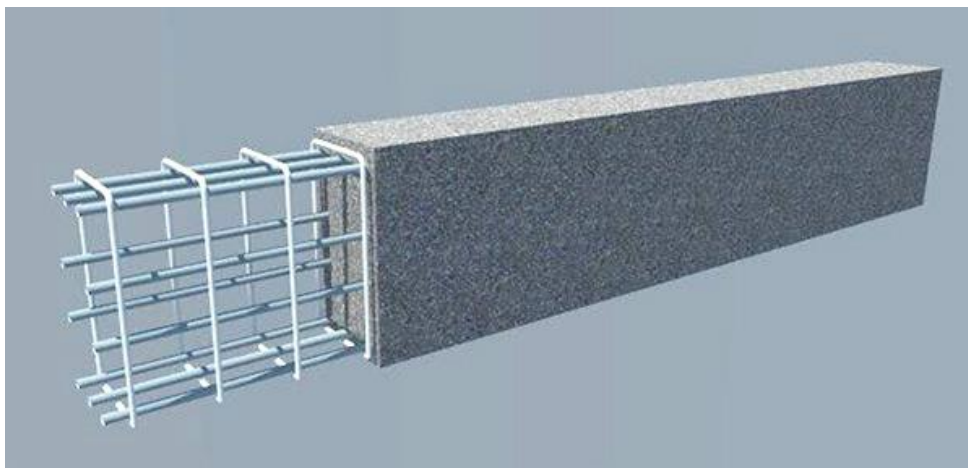


Figura 2.4 – Exemplo de uma viga de betão armado [3].

Como todos os materiais, o betão armado tem os seus pontos fortes e as suas particularidades menos positivas. No que diz respeito ao aspeto económico, é de referir que os custos inerentes à utilização deste material na construção são bastante apelativos comparativamente com outros materiais. De igual forma os custos de manutenção, numa fase de utilização das estruturas, são relativamente baixos [4]. A facilidade de aquisição dos materiais para a mistura também faz com que este se torne acessível financeiramente. Outra mais-valia é a boa trabalhabilidade do betão, o que também proporciona a que a mão-de-obra não precise de formação específica para a sua aplicação em obra. Relativamente ao desempenho, recorda-se que o betão armado consegue resistir quer a esforços de compressão, quer a esforços de tração. Por último, de referir que embora se questione bastante a resistência das estruturas de betão armado aos agentes de degradação, é de salientar a durabilidade das mesmas depois desses ataques, e muitas das vezes a sua facilidade de reparação [2]. Contudo, há desvantagens no uso do betão armado, e o seu peso específico é uma delas, como é bastante elevado o seu transporte é mais difícil e dispendioso, por exemplo, em peças de betão pré-fabricado [4]. Por outro lado, e apesar de não ser precisa mão-de-obra com grande qualificação, o facto de existirem muitos intervenientes no processo de produção, acrescido da variabilidade dos constituintes e ainda das condições muito diversas dos estaleiros, é normal que a qualidade do betão seja variável de obra para obra [2].

## 2.3 Fatores de Degradação

Na construção de qualquer edifício são utilizados materiais diferentes, com propriedades e características bastante distintas. As diferentes técnicas construtivas também podem originar uma infinidade de danos nas edificações. Daí, e para uma melhor compreensão, há a necessidade de agrupar os danos em dois grandes grupos: os danos ocorridos em elementos estruturais e os danos ocorridos em elementos não estruturais.

Os danos estruturais ocorrem, como o próprio nome indica, na estrutura da construção. Dependem diretamente das ações que podem atuar sobre a edificação, bem como, do tipo de material empregue na mesma. Sabe-se que materiais dúcteis aguentam uma maior deformação, enquanto materiais frágeis entram em rotura mais rapidamente. Relativamente aos danos que ocorrem em elementos não estruturais, têm também origem nos materiais e nas ações atuantes nesses elementos, por exemplo, podem-se referir os danos ocorridos nas paredes interiores e exteriores dos edifícios, e os danos nos revestimentos.

De forma a perceber melhor as origens de danos encontrados nas edificações, subdividem-se ainda nestas quatro classes: danos biológicos, danos físicos, danos químicos e danos mecânicos, que serão abordados pormenorizadamente nos sub-capítulos seguintes [4].

### 2.3.1 Danos Biológicos

Os danos biológicos podem estar diretamente ligados ao fenómeno da corrosão e podem ter origem vegetal ou animal. Os organismos vivos que provocam este fenómeno, que se manifesta sobretudo nas superfícies dos materiais, tendem a alojar-se e a exercer as suas atividades na camada superficial dos materiais (Figs. 2.5 e 2.6). Quando os organismos vivos morrem, a sua decomposição também pode provocar danos. Estas atividades podem ser de carácter físico, químico ou os dois em simultâneo, mas na maioria dos casos não apresentam grande perigo para a construção. Os agentes que provocam estes danos podem ser microrganismos, organismos e plantas, como por exemplo, bactérias, fungos, algas, entre outros [2].



Figura 2.5 – Fungo em parede [5].



Figura 2.6 – Bolor e musgo em paredes de betão [6].

### 2.3.2 Danos Físicos

Os danos físicos resultam em grande parte de alterações no meio ambiente, nomeadamente das alterações climáticas. Ações como gelo/degelo, alteração da temperatura, alteração da humidade, erosão, depósitos atmosféricos são alguns dos exemplos que podem gerar danos de origem física.

- Ciclos de gelo/degelo

Os ciclos de gelo/degelo são muito comuns em zonas onde há uma grande oscilação da temperatura. A água, que por algum motivo entrou em contacto com o betão, fica retida no mesmo, levando a este tipo de fenómeno. Este acontece quando se verifica a passagem da água do estado líquido para sólido, devido a temperaturas reduzidas. Há medida que isso sucede, é notório um aumento do volume da água na ordem dos 9%, que é limitado pelo volume dos poros existentes. Geram-se então tensões de tração no interior do betão, e consequentemente acaba por originar fendilhação e degradação do betão (Fig. 2.7) [7].

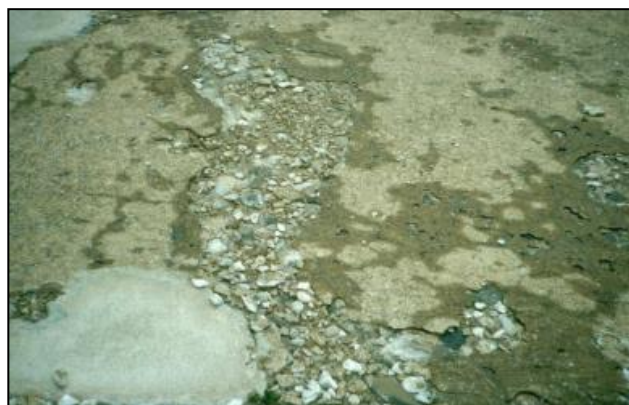


Figura 2.7 – Delaminação da zona superficial do betão causada pela ação do gelo/degelo [8].



Na Figura 2.7 é notória a delaminação do betão devido a ação gelo/desgelo. De salientar que estes danos manifestam-se depois de sucessivas repetições destas ações. E por sua vez, estas ações só ocorrem quando os vazios existentes no betão se encontram repletos de água, e as temperaturas locais atingem graus abaixo de zero [8].

- Variações de temperatura

O betão armado quando sujeito a variações da temperatura sofre deformações. Essas deformações não são preocupantes, quando tudo foi tido em conta na fase de projeto, e a estrutura tem liberdade, ainda que condicionada, para dilatar livremente. Mas quando isso não acontece, a restrição das peças de betão armado às deformações vão gerar tensões internas que podem originar fendilhação no betão.

Quando a peça de betão armado por qualquer motivo está frequentemente em contacto com a água, esta ao evaporar rapidamente, e caso seja um caso frequente, pode originar na peça alterações superficiais dos materiais, como por exemplo, esfoliações [2].

- Humidade

A água está muito presente quando se fala das patologias, sendo considerada o principal agente de deterioração das construções. A humidade presente no betão pode ter diversas origens: a humidade existente na obra, cuja origem está diretamente relacionada com a execução do próprio edifício, ou seja, da água que não evaporou antes que lhe fossem implementados novos materiais; a humidade que existe nas partes de betão em contacto com o solo, que acaba por subir pelo edifício através da capilaridade; a humidade que se infiltra pela habitação através de aberturas existentes na própria fachada; e por fim, a humidade que acidentalmente entra na construção, por erros técnicos ou mesmo rotura de uma canalização (Fig. 2.8) [4].

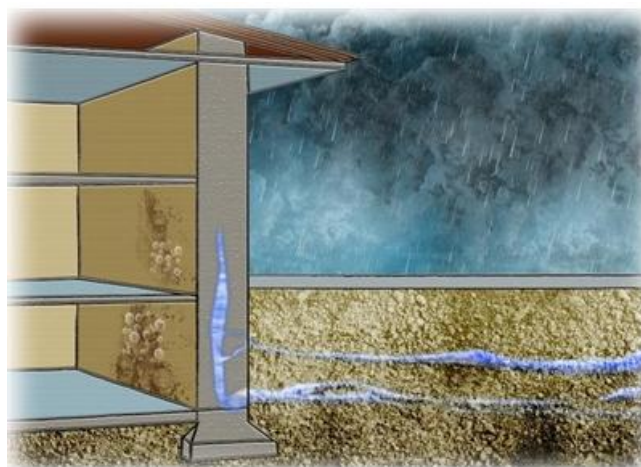


Figura 2.8 – Humidade que se infiltra no edifício por capilaridade [9].

Na Figura 2.8 apresenta-se um exemplo de como a água se infiltra nas paredes do edifício por capilaridade. A existência de um lençol freático permanente pode gerar este tipo de situações, sendo mais frequentes em períodos em que as chuvas são mais intensas e, por consequência, o nível das águas é superior. Também os erros de construção ou de manutenção deficitária das edificações podem causar este tipo de problema. Neste contexto a escolha dos materiais a utilizar é muito importante, pois consoante a sua maior ou menor porosidade, estes podem absorver mais ou menos água. Salienta-se ainda que a água absorvida arrasta consigo todo o tipo de sais existentes nos solos, que torna a situação ainda mais grave. Depois de evaporada a água, os sais permanecem nos elementos estruturais, nas camadas exteriores, formando eflorescências e/ou criptoflorescências, degradando velozmente as estruturas [2]. A Figura 2.9 é exemplo disso.



Figura 2.9 – Humidade absorvida por capilaridade e que provocou criptoflorescências [10].

A humidade não se faz sentir apenas com a água que vem do exterior e que de alguma forma se aloja nas estruturas manifestando-se mais tarde [4]. Também a condensação que se faz sentir da parte de dentro das construções é um fator de risco, uma vez que leva ao aparecimento de bactérias e fungos, que prejudicam não só os elementos estruturais como também a saúde dos que lá habitam (Fig. 2.10). A não existência de áreas ventiladas é a causa mais apontada para este tipo de situações [2].



Figura 2.10 – Humidade nas paredes superiores originada por condensação [11].

- Erosão

A erosão é também uma ação importante que contribui para a ocorrência de danos físicos. A perda ou a transformação de materiais, como a desagregação de partículas, estão associados aos danos causados por esta ação (Fig. 2.11) [4]. Este tipo de fenómenos acontece geralmente em locais cuja passagem de água é feita a velocidade elevada.



Figura 2.11 – Resultado da erosão numa peça de betão [8].

### 2.3.3 Danos Químicos

A manifestação de danos químicos em elementos de betão armado é provocada pela presença de fluidos agressivos. Da reação química entre estes fluidos, alguns dos quais contendo ácidos minerais e orgânicos, sulfatos, cloretos, nitratos, entre muitos outros [7], e os materiais utilizados nas construções, vai resultar a decomposição destes materiais, o que pode por em



causa a resistência do betão armado a longo prazo. Como exemplos reais, temos a corrosão, oxidação das armaduras e as eflorescências [4].

- Oxidação e corrosão das armaduras

A oxidação e a corrosão são fenómenos que ocorrem nas armaduras do betão armado. Estas armaduras estão protegidas, por uma fina película, aquando da sua introdução no betão, e assim continuam para um pH superior a 9,5 [7]. Mas quando se verifica uma diminuição do pH, juntamente com a existência de humidade, essa película de proteção pode ser destruída deixando a armadura mais vulnerável ao ataque de agentes químicos. Quando isso acontece, proporciona a dissolução do aço, que resulta de uma série de processos químicos até se formar uma camada de óxido de ferro, designada por ferrugem, como se verifica na Figura 2.12. A corrosão traduz-se na perda de partículas superficiais das armaduras, também ela gerada pela ocorrência de algumas reações químicas nos materiais [4]. A oxidação das armaduras pode provocar o destacamento das camadas superficiais dos elementos de betão armado, acelerando ainda mais o processo de corrosão das armaduras [12].

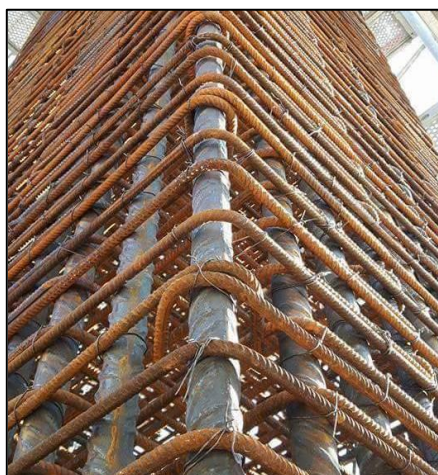


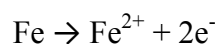
Figura 2.12 – Oxidação das armaduras [13]

Estes fenómenos de oxidação e corrosão, em estruturas de betão armado, são mais frequentes do que o que se desejava e tem consequências bastante graves nas edificações. A partir do momento que as armaduras são afetadas, gera-se um desencadear de reações físicas e químicas, que tem como consequência a criação de tensões no betão. Estas por sua vez originam o aparecimento de fendas, que podem provocar desprendimentos da camada de recobrimento, como já referido anteriormente, deixando assim o betão e as armaduras cada vez mais expostos (Fig. 2.13) [14].

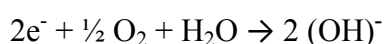


Figura 2.13 – Corrosão das armaduras em viga de betão armado [15].

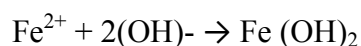
No processo de oxidação existe uma zona anódica, ou seja, a área de passivação é substituída pela região de despassivação, onde a armadura fica mais vulnerável, e uma zona catódica, cujo acesso ao oxigénio é uma constante [16]. Todo este processo inicia-se na zona anódica, onde a oxidação do aço começa a desenvolver-se. Ocorre a primeira reação:



De seguida, a armadura como bom condutor elétrico que é, vai permitir a deslocação dos eletrões ( $2\text{e}^{-}$ ), resultantes da reação anterior, para a zona catódica. Estes ao encontrarem água e oxigénio voltam a reagir gerando logo iões de hidróxido ( $\text{OH}^{-}$ ).



Este produto da reação volta a migrar para a parte anódica, originando assim óxido de ferro, mais vulgarmente chamada de ferrugem. Estes processos são tão rápidos quanto maior for a quantidade de oxigénio e a resistência elétrica dos elementos de betão [16]. Na Figura 2.14 observa-se o ciclo completo do mecanismo de corrosão.



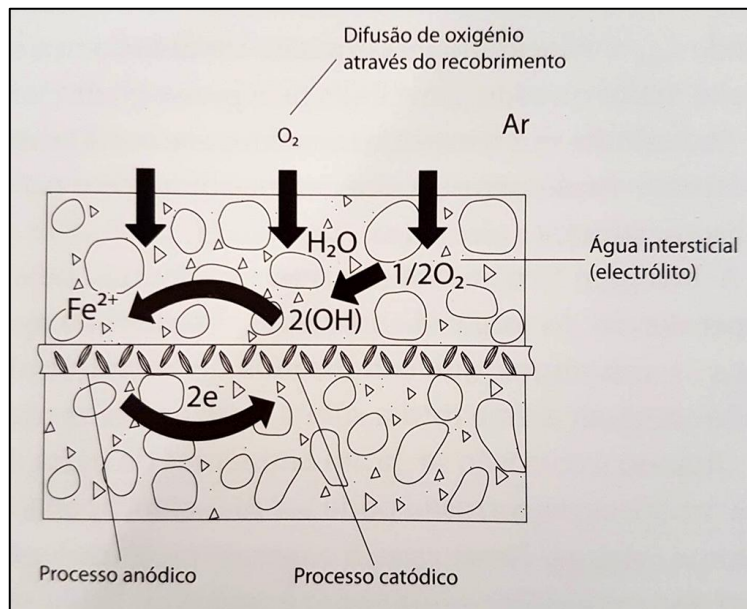


Figura 2.14 – Processos ocorridos na corrosão [2].

Sabe-se ainda que na região anódica, surgem outro tipo de reações, cuja consequência direta será o acréscimo de volume das armaduras, que por sua vez implementam tensões no betão e levam à ocorrência de fendas e delaminação [16].

É natural que ao longo dos anos o betão vá perdendo algumas das suas características e se torne mais vulnerável aos ataques, nomeadamente à carbonatação e à penetração de cloretos. Contudo, existem outras agravantes que fazem com que estes processos se desencadeiem cada vez mais rápido. As fendas, por exemplo, vão permitir a passagem do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) assim como a absorção ainda mais rápida de cloretos, chegando estes facilmente até às armaduras. Também a menor espessura da camada de recobrimento das armaduras, quer por erros de projeto, quer por erros de execução em obra, ou a elevada porosidade do betão, vão facilitar a entrada destes agentes de deterioração [2].

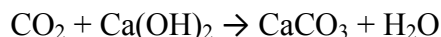
Resumindo, a carbonatação do betão e/ou existência de cloretos no mesmo originam a desproteção das armaduras e, portanto, são preponderantes para que se inicie o processo de corrosão das armaduras.

- Carbonatação do betão

O betão tem um papel muito importante na proteção das armaduras quando tem um pH acima dos 9,5 mas quando isso não acontece e ele começa a perder a alcalinidade. Essa redução do pH pode ocorrer devido à carbonatação, ou seja, devido ao seu contacto com o  $\text{CO}_2$  existente na atmosfera. A carbonatação do betão é tanto mais rápida quanto maior for a quantidade de  $\text{CO}_2$  presente no ar e quanto maior for a porosidade do betão.

Este processo acontece pela facilidade de reação entre o  $\text{CO}_2$  presente no ar e o hidróxido de cálcio existente no betão, resultante das reações de hidratação do cimento. Desta reação

obtém-se carbonato de cálcio que leva à redução brusca do pH, nomeadamente, para valores abaixo dos 9,5. A fórmula que explica a reação é a seguinte:



A reação mencionada acima é a principal mas não é a única que contribui para a diminuição do pH do betão. Tanto os aluminatos de cálcio hidratados, como os silicatos de cálcio hidratados ao reagirem com o  $\text{CO}_2$  também provocam essa mesma transformação. Após a ocorrência destas reações, havendo a presença de oxigénio e água, e tendo presente que a alcalinidade do betão foi reduzida, verifica-se que a perda da película protetora das armaduras. Começa então o processo seguinte, o de oxidação [2].

- Cloretos no betão

A existência de cloretos no betão também se torna prejudicial para o aço, favorecendo a formação de óxido de ferro. Estes podem estar presentes nas estruturas devido a vários fatores. Em cada região, há uma percentagem de cloretos diferente. Por exemplo, junto à orla costeira, é inevitável a presença destes sais, consequentemente, quando se executam as estruturas nestas regiões verifica-se que muitas das vezes os cloretos entram na mistura, camuflados nos agregados ou na água utilizada. Assim sendo, não é de todo apropriada a utilização de agregados provenientes de zonas cujo contacto com água salgada é uma constante. O contacto de cloretos com as estruturas de betão é também habitual em zonas mais frias, nomeadamente em locais onde a formação de gelo é comum, pois nestas regiões é usual utilizar-se estes sais para derreter a neve, desimpedindo assim as vias de comunicação [2]. Todavia, salienta-se que para que a carbonatação ou a presença de cloretos se torne prejudicial para as armaduras é sempre necessária a existência de água e de oxigénio.

- Eflorescências

Os sais dissolvidos na água, que o betão vai absorvendo, são também arrastados para as partes exteriores do mesmo. Devido à evaporação da água, estes sais vão cristalizar. A este fenómeno dá-se o nome de eflorescência, como se pode observar na Figura 2.15. Por vezes, essa cristalização ocorre nos vazios nos elementos de betão, provocando desprendimentos nas camadas mais superficiais, o que leva à erosão do material e, consequentemente, à perda de resistência. Na Figura 2.16 pode-se visualizar um caso particular, as criptoefflorescências [4].



Figura 2.15 – Parede de betão armado onde são visíveis eflorescências [17]



Figura 2.16 – Criptoflorescência [18]

Como já referido, estes danos são causados pela presença de sais nas edificações, sendo os mais frequentes: os carbonatos, os cloretos, os nitratos e os sulfatos. Pode verificar-se ainda que estes fenómenos ocorrem em zonas húmidas, pelo que é através da água que ocorre a migração dos sais [18].

#### 2.3.4 Danos Mecânicos

As estruturas de betão armado, ao longo da sua vida útil, estão sujeitas a muitas solicitações externas, são exemplo disso: os assentamentos; o carregamento em excesso, para o qual a estrutura não foi dimensionada; as ações acidentais, como o impacto de elementos externos; e até mesmo vibrações, provocadas por equipamentos de grande porte a trabalhar perto do local de implementação da obra. Todas estas ações externas podem provocar tensões nos elementos de betão armado, dando origem a deformações excessivas, fendas largas, desprendimentos da camada de recobrimento, ou seja, os danos mecânicos. Após a ocorrência deste tipo de danos, os elementos de betão armado ficam mais vulnerável ao ataque dos agentes externos [7].

As deformações são, por definição, alteração da forma do elemento estrutural, e quando são demasiado elevadas são prejudiciais à construção. Este tipo de dano é muito frequente e pode acontecer a curto prazo, logo na fase de execução, ou a longo prazo, passado algum tempo da estrutura estar em funcionamento. Um tipo de deformação muito frequente é a encurvadura, resulta do excesso de esforços de compressão aplicados em elementos verticais esbeltos [4].

Devido às deformações excessivas podem ser gerados outros tipos de danos, como fendas largas ou até mesmo desprendimentos de certas camadas de betão.

Nas edificações correntes podem-se avistar vários tipos de fendas, nomeadamente, as que tem um carácter mais superficial, ou seja, que ocorrem maioritariamente nos revestimentos, na parte exterior das construções, e as mais profundas que se prendem com as estruturas propriamente ditas. Há várias causas para a origem das fendas superficiais, por exemplo, a retração da argamassa, deformação do solo, as descontinuidades nos apoios que fazem com que o revestimento não consiga acompanhar a deformação da estrutura, movimentos de dilatação causados pela utilização de diferentes materiais, a dilatação e contração originada pela variação da temperatura [4]. Os problemas originados pela última causa podem ser minimizados adotando nos elementos de fachada juntas de dilatação. Na Figura 2.17 apresenta-se uma parede com revestimento em argamassa, onde se observa uma fenda superficial.

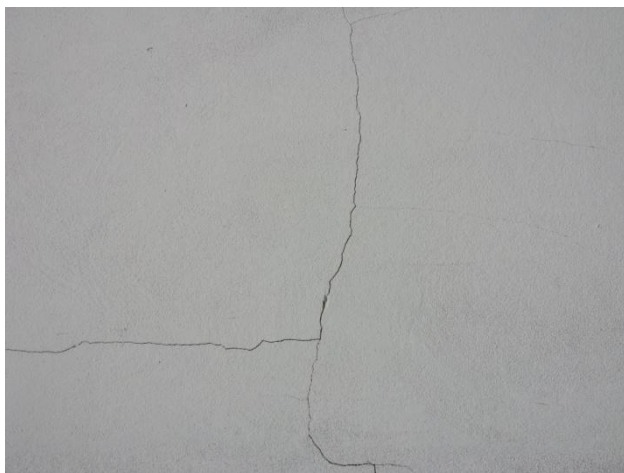


Figura 2.17 – Fenda superficial no revestimento de argamassa de uma parede.

O fenómeno de fendilhação não afeta apenas a superfície dos elementos construtivos. Como se sabe, o betão tem pouca resistência à tração então quando é sujeito a esforços deste tipo, cujas solicitações causam tensões superiores à tensão máxima resistente à tração, ocorre a fendilhação. As ações que estão por detrás deste tipo de solicitações podem resumir-se à carga excessiva exercida na estrutura ou as próprias deformações estruturais. Este tipo de deformações podem ter origem nos assentamentos diferenciais ou nos movimentos causados pela variação acentuada de temperatura [2]. Na Figura 2.18 pode observar-se uma laje de



betão armado com um caso grave de fendilhação, a fenda já tinha alguns milímetros de largura e teve de ser intervencionada.



Figura 2.18 – Fissura em laje de betão armado [19]

Neste grupo de danos mecânicos temos ainda os desprendimentos, que ocorrem sempre que se verifica uma separação entre materiais. Estes acontecimentos aparecem sobretudo em revestimentos superficiais e ocorrem devido à fendilhação do betão, à humidade e às deformações [4].

## 2.4 Origem dos fatores de degradação

Uma estrutura de betão armado está sujeita a diversas ações ao longo da sua vida útil. Essas ações podem ser muito distintas entre si e provocam também efeitos bastante diferentes, tanto na estrutura como nos restantes elementos construtivos. Convém identificar corretamente essas ações, pois podem ser a causa de uma patologia. Esse conhecimento é fundamental para corrigir eficazmente a patologia, evitando que volte a manifestar-se. Para uma melhor compreensão das causas que estão na origem das patologias é melhor agrupá-las em dois grandes grupos: causas diretas e causas indiretas.

### 2.4.1 Causas Diretas

Causas diretas são todas as que produzem ações sobre as estruturas de betão armado. Por norma, as que atuam sobre os elementos estruturais designam-se por ações mecânicas, e as que atuam sobre os seus materiais constituintes são ações biológicas, físicas e químicas [4]. São também consideradas dentro deste grupo todas as intervenções deficientes efetuadas no edifício, das quais derivaram maus resultados.

Tabela 2.1 – Resumo das ações atuantes nas estruturas, as causas e os danos associados  
[adaptado de [20]]

Causa	Ação	Tipo de causa	Dano provocado
<b>Direta</b>	Mecânica	Esforços excessivos, pela alteração da carga prevista; Impulsos, ações não dimensionadas para tal; Impacto, por colisão acidental; Desgaste, devido a agentes de deterioração.	Fendilhação Deformação Desprendimentos
	Biológica	Organismos vivos, que se alojam na superfície dos materiais e que com a sua atividade os decompõem	Erosão Sujidade
	Física	Alterações climáticas bruscas, como variação da temperatura, vento, chuva; Erosão	Humidade Deformação Esfoliação Degradação dos materiais
	Química	Humidade, causada pela chuva, má secagem da obra Presença de sais, que na presença de humidade reagem e provocam vários danos; Presença de organismos vivos.	Oxidação Corrosão Eflorescências

Na Tabela 2.1 podem encontrar-se o tipo de ações que podem existir numa edificação, assim como o tipo de causa para essas ações e os danos que podem provocar.

As ações mecânicas, muitas vezes consideradas como acidentais, vão provocar variadíssimos danos, como já referido anteriormente. De entre algumas causas, salienta-se todas as ações que atuam na estrutura do edifício e que não foram contabilizadas na fase de projeto, quer porque não foram previstas ou porque há elementos que não estão a cumprir a sua função e a delegam noutro, ou quando se dá uma colisão contra um elemento estrutural gerando a redistribuição de tensões que a torna prejudicial à estrutura [20].

Já nas ações biológicas, físicas e químicas, as suas causas são encaradas como naturais. Todos os organismos vivos que se instalam nas superfícies da estrutura contribuem para a sua decomposição, assim como, todas as alterações de clima, como as variações de temperatura, as chuvas intensas que provocam as humidades e o vento que contribui para a erosão [4].

Alguns danos nas estruturas têm como causa os chamados danos prévios, isto é, aconteceram anteriormente. Como exemplo de danos prévios têm-se [20]:

- Deformações: provocam desprendimentos e fendas;



- Humidade: causa corrosão e eflorescências;
- Desprendimentos e fendilhação: originam a erosão, agravam a corrosão e a humidade.

### 2.4.2 Causas Indiretas

As patologias que aparecem nas construções manifestam-se quando sujeitas a ações que tem como origem causas diretas, como foi referido no ponto anterior. Mas, na maior parte das vezes, tem outros antecedentes, as causas indiretas. Más escolhas em fase de projeto e de execução acarretam consequências, por vezes muito graves, para estabilidade das estruturas de betão.

Dos erros que podem ser cometidos na fase de projeto de uma estrutura de betão armado destacam-se as incorreções na quantificação e dimensionamento das ações, a má escolha do programa de cálculo ou a incapacidade de analisar corretamente o resultado obtido através dele, a escolha inadequada dos materiais a serem utilizados na construção e, a falta e erro na pormenorização para a melhor compreensão na fase de execução. Esses erros também são causados por falta de informação em áreas como a geotecnia, o meio ambiente em que se vai construir e a inexperiência dos projetistas na análise de resultados obtidos [21].

Na fase de execução, a falta de acompanhamento do projetista para esclarecer dúvidas quando existe uma pormenorização deficitária ou até mesmo para ajudar a interpretar o projeto, dificulta a realização da construção e provavelmente essa ausência pode estar na origem de complicações futuras [20].

## 2.5 Quais e em que fase são detetados danos nas estruturas de betão armado

Os problemas encontrados nas construções podem ser dos mais variados e podem ter diversas causas, como já referido anteriormente. Estas patologias prendem-se, por exemplo, com assentamentos nos apoios, deformações elevadas, com a qualidade dos materiais aplicados, que está diretamente associado à durabilidade das estruturas, e até mesmo, com a falta ou a inadequada manutenção da construção.

Nas estruturas de betão é aconselhável que os erros se detetem na fase de projeto, pois quanto mais cedo isso acontecer, menores serão as consequências no futuro. Todavia, isso não acontece e muitos dos danos são visualizados apenas na fase de construção ou mesmo aquando da manutenção das mesmas.

- Fase de projeto

A fase de projeto é muito importante no processo de construção de estruturas de betão armado. Os projetistas têm de ter elevados conhecimentos, quer a nível estrutural, quer no que respeita aos materiais utilizados e à forma como estes interagem entre si, e principalmente têm

de proporcionar o cruzamento de dados de todas as especialidades necessárias para executar a obra. Com este procedimento a possibilidade de ocorrência de erros torna-se mais pequena.

Estão incluídos nesta etapa todos os processos de conceção e modelação estrutural, o cálculo de todas as ações atuantes e a verificação dos estados limites, ou seja, da segurança da estrutura [4].

Verifica-se que é necessário ter em conta vários fatores na conceção e dimensionamento da estrutura para, no futuro, minimizar os problemas de deterioração. Deve ter-se em conta a dimensão e facilidade de produção das peças de betão armado, conciliar com o projeto de drenagem para que não haja contacto com águas tóxicas, dar especial atenção às juntas, respeitar todas as disposições construtivas, por exemplo garantir que os todos os agregados possam rodear as armaduras evitando espaços vazios, e ainda ter atenção na escolha da espessura do recobrimento, pois quanto maior mais elevada é a proteção das armaduras [2].

Ainda assim, muitas das vezes o problema não está na forma como se planeia a realização dos elementos estruturais mas sim nos métodos e principalmente nos programas de cálculo automático utilizados para esse efeito. Estes programas para além de usarem métodos complexos e exatos, possibilitam a rapidez no dimensionamento, permitem quer a otimização das peças de betão, como também, a comparação automática entre outras opções, ou seja, agilizam todo o processo de cálculo. Mas este método não tem apenas vantagens, pelo que podem surgir erros bastante graves pela utilização dos mesmos. Em primeiro lugar, tem-se a ideia de que qualquer pessoa está apta a manusear este tipo de programas. De facto, a facilidade de introdução de dados neste tipo de plataformas pode levar a esse tipo de pensamento, contudo, e mesmo com a agilidade dos programas, há que saber um conjunto de normas e regras de forma a assegurar o comportamento adequado das estruturas, daí serem necessários técnicos com formação especializada. Outro problema prende-se com o facto dos próprios programas serem cópias não registadas. A acrescentar, a idade avançada dessas réplicas, que padecem de erros, nomeadamente no que respeita à atualização de regras, já para não falar que muitos deles têm origem noutros países, cujas normas não se aplicam de todo em Portugal. Como forma de colmatar estas falhas, os projetistas devem procurar o uso de programas legais e atualizados [4].

Quanto ao uso do programa em si, a escolha deve recair sobre o que mais se adequa à situação de cálculo que se pretende. É igualmente relevante que, mesmo depois da escolha mais acertada do programa, o projetista tenha uma noção da estrutura que deseja dimensionar e equacione a realização do cálculos de alguns elementos pelos métodos mais tradicionais para que possa comparar com os resultados do programa e assim conseguir despistar algum erro mais evidente. Apesar da forma simplificada de introdução de dados, muitas vezes recai sobre esta tarefa a maior percentagem de erros. A falta de rigor do técnico, a distração, ou até mesmo a falta de confirmação dos mesmos pode originar erros, que caso não sejam detetados a tempo, podem comprometer em muito a segurança da estrutura. Por fim, salienta-se a importância da correta análise de resultados [4].

Os erros não são apenas realizados pelos programas de cálculo automático. É comum existirem falhas, ainda na fase de projeto, cuja razão se prende com a estimativa das ações

atuantes não ser a mais correta, como por exemplo, do peso próprio da estrutura e das sobrecargas. Outro problema acontece quando as construções são dimensionadas para um certo tipo de cargas e posteriormente são utilizadas para funções completamente díspares, que implicam a aplicação de cargas para as quais a estrutura não foi dimensionada [4].

Outros erros de projeto prendem-se com cada elemento da estrutura em particular, como é o caso das vigas, pilares, muros de suporte, e com as particularidades de resistência de cada um. Reforça-se a ideia que o projetista tem de saber aplicar um cem número de normas e regras, para além, claro, dos conhecimentos estruturais, por forma a garantir a segurança de todas esses elementos estruturais.

- Fase de execução

Os danos que podem surgir desta etapa ocorrem sobretudo por erro humano, ou seja, pela falta de formação na utilização dos materiais e máquinas, pela falta de diálogo dos que projetam para com os que executam, pela escassez no que respeita aos pormenores construtivos, e mesmo pela insuficiência de controlo de qualidade e fiscalização. Há ainda uma cota parte de culpa causada pelo comportamento inesperado dos materiais ou pela má opção relativa aos métodos construtivos a serem usados [2].

As falhas por erro humano passam muito pela diversidade de trabalhadores que estão envolvidos num projeto e execução de uma estrutura de betão armado. Por vezes, a comunicação entre os vários intervenientes não é fácil, pelo que quem ouve pode não perceber quem explica. A falta de formação ou experiência de obra também tem consequências a nível da qualidade de execução. Não menos importante tem-se o fator económico. Para poupar nos custos, pela ambição desmedida de alguns construtores, não há investimento suficiente em nova tecnologia, nem em mão de obra qualificada, muito menos no controlo de qualidade. Se por um lado há uma poupança imediata, por outro, as consequências passado algum tempo podem ser bastante dispendiosas. Também no que respeita ao cumprimento de prazos, o efeito pode ser negativo, pois as equipas são obrigadas a trabalhar mais, num curto espaço de tempo, que se torna prejudicial na execução de alguns elementos [4].

Problemas como o transporte do betão, nomeadamente, a segregação do mesmo; com a elaboração da mistura, por exemplo, caso os materiais não originem uma mistura homogénea, e até mesmo a má colocação do betão em obra, podem revelar-se nocivas à construção de estruturas de boa qualidade.

- Utilização e manutenção da estrutura

Durante este período os problemas surgem com a utilização das estruturas de betão armado. Em muitos casos, são impostas ações às estruturas para as quais estas não foram

dimensionadas, colocando em risco a segurança dos seus utilizadores. Ações externas como vibrações ou impactos aparecerem e causam danos nas construções. Estes danos podem também estar relacionados com falhas da fase de projeto [20]. Contudo, as causas dos danos mais relevantes nesta fase são o próprio envelhecimento dos materiais, a contaminação devido ao contacto com determinadas águas e o ambiente em que a própria estrutura se encontra implementada. Convém que os utilizadores façam um controlo permanente e assim que sejam notados os primeiros sinais de degradação devem solicitar os meios necessários para se realizar a reparação da patologia [4].

### **3. PRINCÍPIOS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO**

#### **3.1 Enquadramento**

As estruturas de betão armado são por norma conhecidas pela sua elevada durabilidade e resistência. Contudo, com a sua exposição a fatores de deterioração, estas duas características podem ser afetadas. Para manter as construções num nível de segurança e conforto adequados é necessário haver um plano eficiente de manutenção para que quando comecem a manifestar-se alguns sinais de patologias seja acionado o plano de intervenção [22]. Nestes casos é fundamental pedir a ajuda de técnicos especializados. Este vai analisar o local com algum detalhe de forma a conseguir obter o máximo de dados possíveis, a fim de determinar a causa que esteve na origem daquela patologia e assim, numa fase posterior, arranjar as soluções que melhor se adequam aquele problema. Existem alguns procedimentos que o técnico deve adotar, pela seguinte ordem: observação do local/ inspeção visual, seguida de levantamento de todos os dados necessários, análise dos mesmos e diagnóstico. Caso seja necessário deve haver ainda uma fase de prognóstico [4, 23].

#### **3.2 Observação dos Danos**

A inspeção visual preliminar é o princípio para uma análise detalhada no processo de diagnóstico de uma patologia. Neste primeiro passo devem ser detetadas todas as anomalias, observando a sua localização e analisando a sua intensidade. Nesta fase pretende-se identificar o dano, tentar associar a uma causa, ou pelo menos descobrir qual o fenómeno de deterioração que lhe deu origem, verificar se há possibilidade de piorar a curto prazo e definir se é ou não necessário realizar ensaios complementares. Para alguns técnicos dependendo da patologia em questão é fácil identificar a causa associada ao dano, logo nesta fase de observação. Contudo, na maior parte dos casos é necessário recorrer à realização de ensaios para posteriormente elaborar uma solução acertada [23].

#### **3.3 Recolha de Dados**

Após a fase de observação, segue-se uma outra, ainda mais complexa: a fase de recolha de dados. Nesta etapa, o técnico vai recolher o máximo de dados possíveis que lhe permitirão depois fazer uma boa avaliação dos danos encontrados.

Primeiros aspetos a ter em conta prendem-se com a análise da patologia. É necessário recolher informações que permitam saber de que tipo de anomalias se trata, quando costumam ocorrer e qual a sua frequência. Essa informação deve ser agrupada consoante as suas semelhanças. Questões como a natureza do edifício, a sua função, a data de implantação, bem como, todas as intervenções feitas até então devem ser também solicitadas junto das entidades competentes. O técnico deve ainda realizar um documentário fotográfico detalhado.

Pela visualização do dano há particularidades que se conseguem facilmente identificar, nomeadamente no que diz respeito aos materiais, bem como quais os elementos estruturais afetados. A deteção da causa das anomalias em questão é facilitada quando se tem acesso a todos os pormenores construtivos, que incluem cálculos efetuados, materiais escolhidos para a construção, toda a memória descritiva acerca da conceção do edifício, incluindo todas as peças desenhadas. Sempre que o projeto suscitar dúvidas, por ser detetada uma discrepância entre os elementos descritos e o que realmente se constata existir no edifício, ou para uma melhor análise do problema, o técnico deve proceder à recolha de amostras para análise em laboratório [4].

Não só se deve recolher toda a informação sobre o edifício mas também tudo o que descreve o meio ambiental em que este está implementado. Dados que caracterizam o clima, como a intensidade e frequência das chuvas, os ventos, a insolação, o nível de humidade, e a localização do mesmo relativamente a outros, ou à exposição de determinadas substâncias químicas, são bastante importantes na deteção dos problemas.

Pela quantidade de informação a reter, por vezes é necessária mais do que uma visita ao local. Cabe ao especialista a escolha de todo o material que o irá acompanhar nesta inspeção, assim como, a responsabilidade da seleção das zonas a analisar. Por norma, há locais mais suscetíveis à ocorrência de patologias do que outros e são esses os merecedores de toda a atenção. São exemplos disso, estruturas expostas a ambientes mais agressivos e as zonas da estrutura submetidas aos esforços mais elevados.

Acabada a inspeção visual preliminar e a recolha de dados, e caso não seja possível desde logo estabelecer uma causa para os danos detetados, deve proceder-se a uma nova planificação para uma inspeção mais detalhada. Nesta etapa, o técnico vai ter como prioridade a realização de ensaios. Tudo tem de ser programado: a escolha do ensaio, o local onde é feito, a quantidade e até mesmo a informação a retirar do mesmo. Como o interesse deste tipo de ensaios é obter a máxima informação, deixando a estrutura o menos danificada possível, deve-se optar pela realização de ensaios não destrutivos. Só em último caso é que se recorre à realização de ensaios destrutivos. Pode-se ainda recorrer a sistemas de monitorização quando há necessidade de acompanhar a evolução da patologia em estudo, a fim de perceber todos os mecanismos a ela associados [2].

Por fim, salienta-se que o técnico especializado deve de ser bastante organizado com toda a informação recolhida, usando-se normalmente uma Ficha de Recolha de Dados [4].

### 3.4 Métodos Auxiliares de Diagnóstico

Quando se começam a notar danos nas construções é necessária uma intervenção rápida e concisa. Para isso, e antes de ser intervencionada, a estrutura tem de sofrer uma análise aprofundada. O objetivo dessa avaliação é descobrir as causas por detrás de cada uma das anomalias, para que posteriormente se consiga arranjar uma boa solução de reabilitação.

O estudo da estrutura começa sempre pela inspeção visual. Alguns técnicos conseguem desde logo detetar a origem da anomalia, quando esta é de fácil compreensão. O que não acontece na maior parte das vezes. Assim, torna-se necessária uma inspeção mais detalhada onde é recolhida e anotada toda a informação acerca do dano em análise. Todos os ensaios necessários devem ser realizados nesta etapa.

Dos ensaios a serem considerados, podem dividir-se em três grandes grupos: a mera inspeção visual, os ensaios não destrutivos ou semi destrutivos e, por fim, os ensaios destrutivos. A descrição desses ensaios será desenvolvida neste capítulo. Quando o técnico acha que já tem toda a informação necessária procede à sua avaliação, a fim de diagnosticar a proveniência da patologia e de modo a definir a solução mais adequada [12].

#### 3.4.1 Inspeção Visual

Para uma inspeção ser bem-sucedida há que recolher o máximo de informação possível de maneira a descobrir as causas daquele tipo de comportamentos nos edifícios. Antes de começar com os ensaios propriamente ditos, o técnico tem de fazer uma inspeção visual (Fig. 3.1). Por muitos considerado um ensaio, encaixado no grupo dos ensaios não destrutivos, este primeiro passo exige da parte do avaliador um profundo conhecimento na área estrutural [24].

Todas as observações não serão apenas limitadas à estrutura danificada, mas também ao meio que a rodeia. A deteção dos danos visíveis como fendas, desprendimentos, manchas de humidade, bolores, alteração de características, entre outros, é bastante relevante nesta etapa do processo. Apesar de tudo, este tipo de levantamentos visuais pode levar a uma discrepância de opiniões entre técnicos [20].

Um dos senãos da inspeção visual está relacionado com a sua limitação relativamente a área de visualização, uma vez que a pessoa responsável por esta tarefa só consegue avaliar a superfície da estrutura. Fatores como o tamanho reduzido, a própria superfície e o brilho e o contraste onde se encontram os danos vão dificultar o trabalho. Contudo, e para auxiliar essa ação, o técnico tem ao seu dispor vários meios complementares de inspeção como máquinas fotográficas, fitas métricas, lupas, marcadores, binóculos, entre outros [25].

Para realizar esta tarefa a iluminação é indispensável. Para uma boa deteção de anomalias, estas tem de estar bem visíveis, e caso isso não seja possível com a iluminação que o local dispõe, deve ser fornecida ao local luz artificial [26].

A inspeção visual deve ainda ser limitada no tempo em cada área a ser analisada. A duração excessiva da avaliação pode incutir erros no observador que poderão revelar-se cruciais na apreciação final. Motivos como o cansaço, e consequente diminuição visual são inimigos da boa capacidade de discriminação dos danos em análise [12].

As etapas que o avaliador deve seguir numa inspeção visual são:

- Consulta de toda a informação documental acerca do edifício. O técnico deve ambientar-se com o tipo de estrutura que vai encontrar, os materiais utilizados na mesma e todas as alterações ou reparações feitas até então [20];
- Observação e classificação de todas as patologias encontradas na estrutura, refletindo logo sobre a possível origem;
- Comparação de anomalias, que permitem descobrir padrões ou a falta deles, para a descoberta de possíveis zonas afetadas;
- Registo de todos os dados observados.

Para concluir, em forma de resumo, tem-se a inspeção visual como um poderoso instrumento de avaliação de situações anómalas. É o princípio de todos os ensaios e tem como objetivo a identificação de patologias, a verificação da estabilidade da estrutura e a medição das mesmas, caso seja necessário. O papel do técnico é fundamental, o seu desempenho é fundamental para se realizar o estudo correto das origens das anomalias, pelo que os seus conhecimentos e a sua experiência são essenciais [4].

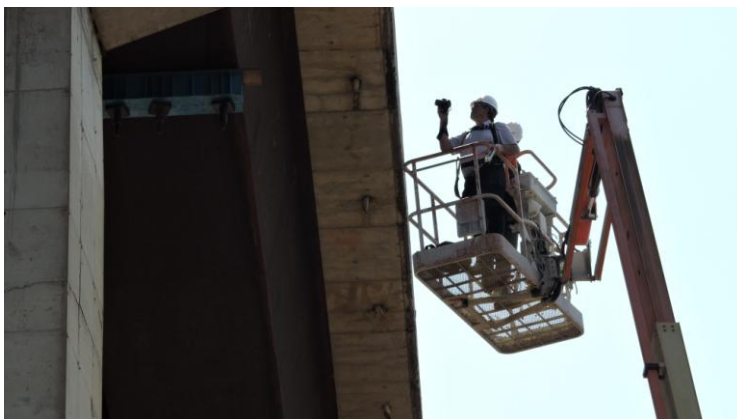


Figura 3.1 – Inspeção visual [27].

### 3.4.2 Ensaios Não destrutivos e semi – destrutivos

As estruturas de betão armado têm muitas vezes erros de conceção que só a olho nu não conseguem ser detetados pelo técnico. Os ensaios não destrutivos vêm portanto facilitar essa tarefa. A avaliação de algumas características físicas e mecânicas, bem como o teor de humidade existente na estrutura, a deteção de vazios e cavidades, entre outras particularidades, são algumas das informações que este tipo de ensaios pode fornecer [20].

No que respeita à designação, estes ensaios são normalmente chamados de “ensaios não destrutivos”, contudo são muito poucos que efetivamente não o são. Embora o grau de destruição seja reduzido, na verdade existe um ou outro dano localizado que é de fácil reparação, logo a terminação mais correta seria de “ensaios semi-destrutivos” [2].



Estes métodos têm sido cada vez mais uma escolha frequente por parte dos técnicos, pois para além de terem um custo reduzido, são ainda de fácil e rápida utilização. Enumeram-se de seguida algumas vantagens: a melhoria da tecnologia usada permite uma boa obtenção de resultados; a segurança dos dados adquiridos, tais como as propriedades dos materiais utilizados na construção; a rapidez e o custo reduzido quando se executam ensaios em áreas bastante grandes [4].

Dependendo do método utilizado, são muitas as propriedades que podem ser conhecidas com os ensaios não destrutivos. A resistência, o módulo de elasticidade e a densidade são alguns dos exemplos. Dados acerca da humidade, da localização das armaduras, da dureza superficial, da absorção e permeabilidade, assim como da existência de fendilhação, também podem ser recolhidos neste tipo de avaliação [28].

Como já foi referido, os danos estruturais não aparecem apenas nos edifícios com alguma idade. Também nos edifícios novos, por variadíssimas razões, podem manifestar-se anomalias. Os ensaios não destrutivos podem realizar-se, tanto em edifícios recentes, como nos mais antigos. Quando utilizados em estruturas mais novas, estes ensaios permitem esclarecer dúvidas no que diz respeito aos materiais empregues e à sua qualidade. Ajudam também, no caso de ensaios monitorizados, a avaliar a capacidade resistente da estrutura ao longo de determinado tempo. Nas estruturas mais antigas, os ensaios vão permitir obter informações sobre a integridade da estrutura de betão e ainda qual a sua capacidade resistente.

Os ensaios não destrutivos fornecem uma série de informações que permitem uma análise detalhada dos elementos constituintes de uma construção. Podem ser recolhidos os seguintes dados [2, 4, 20]:

- As medidas dos elementos estruturais;
- A dimensão e localização de armaduras, e caso exista, os níveis de corrosão da mesma;
- Os níveis de aceitação dos materiais empregues na construção;
- A extensão de fendas e a sua localização;
- A existência de vazios;
- A inexistência de ligação entre os vários elementos da estrutura;
- E a gravidade de danos estruturais, provocadas por danos naturais ou acidentais.

Contudo, este tipo de métodos não apresenta só vantagens. A heterogeneidade na constituição dos elementos de betão, por vezes pode dificultar a obtenção de resultados conclusivos. A inexistência de normas específicas, relativamente a alguns ensaios, pode pôr em causa o correto uso e análise dos mesmos. Assim como, a falta de calibração de alguns instrumentos de inspeção pode levar à obtenção de resultados errados, comprometendo assim toda a análise e diagnóstico [20].

De seguida, fazer-se-á uma breve descrição de alguns ensaios cujo objetivo principal é, não só fornecer dados que permitam caracterizar a estrutura, mas também, dar informações que possibilitem detetar descontinuidades, fendas e ainda determinar propriedades dos materiais

utilizados para a construção. São exemplos disso, os ensaios de carga, as técnicas baseadas na teoria de propagação de ondas, o radar, os métodos com base em ondas mecânicas, os métodos nucleares, os métodos eletromagnéticos, os métodos para determinar a absorção e permeabilidade dos elementos, a termografia, os métodos que permitem determinar parâmetros de resistência e deformabilidade, os ensaios dinâmicos e a fotogrametria [4].

Os ensaios de carga são apropriados para determinar a resistência das estruturas. São ensaios de curta duração e correspondem à aplicação de cargas graduais nos elementos de betão armado, para compreender a forma como estes reagem às solicitações impostas. Normalmente são ensaios realizados em vigas ou lajes de betão armado (Fig. 3.2), por estarem sujeitos a esforços de flexão. Nestes testes os estados limites são verificados, sem nunca pôr em causa a aparência, a durabilidade ou a funcionalidade do edifício em questão [2].



Figura 3.2 – Ensaio de carga com equipamento específico em laje [29].

Com o objetivo de caracterizar alguns materiais que compõem as estruturas de betão é utilizada a técnica que se baseia na teoria de propagação de ondas. Há um sinal que é emitido numa das extremidades da peça e depois é recebido na outra extremidade. A transmissão do sinal pode ser feita por ondas mecânicas ou por ondas eletromagnéticas. Relativamente às primeiras, acontecem sempre que é aplicada uma pressão ou deformação repentina na área superficial de um determinado elemento. Esse sinal vai propagar-se no elemento de modo semelhante à propagação do som no ar, e a sua velocidade depende, por exemplo, da densidade e geometria da peça, do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson. Através da monitorização da propagação dessas ondas, consegue-se perceber o seu comportamento, e a partir daí tirar conclusões acerca das características dos materiais. De entre os vários ensaios que utilizam ondas mecânicas, têm-se os que se baseiam em ondas sonoras, no caso dos ensaios sónicos e ultra sónicos (Fig. 3.3), e os que são baseados em ondas de tensão e/ou impacto [4].

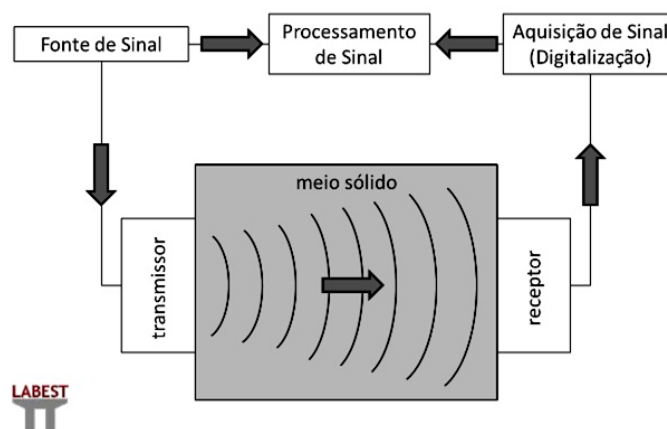


Figura 3.3 – Esquema exemplificativo do ensaio de ultra sons [30].

Outro dos ensaios considerado não destrutivo é o radar. Utilizado, por exemplo, para a deteção de armaduras nas estruturas de betão armado, este método resume-se ao uso de ondas eletromagnéticas, com frequência superior a 100 MHz, a partir de curtos impulsos enviados por uma antena. Essas ondas chegam aos recetores onde são registadas, com comprimentos diferentes o que permite tirar conclusões acerca da presença de armaduras, ou até mesmo acerca de ligações entre os diversos elementos da estrutura. As vantagens que este método proporciona prendem-se com a rápida e eficaz análise em superfícies de grandes comprimentos, a fácil perceção dos elementos nas camadas interiores da estrutura, não visíveis a olho nu, e ainda a possibilidade de detetar humidade interna nos elementos [31].

Sempre que o técnico precisa de obter informações acerca da densidade dos materiais utilizados na construção pode, por exemplo, recorrer a radiometria, um dos ensaios pertencentes ao grupo dos métodos nucleares. Aqui, a intensidade da radiação eletromagnética que passa pelo elemento estrutural é medida por detetores adequados, que a recebem em forma de impulsos elétricos. Para além dos métodos radiométricos, também fazem parte dos métodos nucleares os métodos radiográficos. Este ensaio permite conhecer a estrutura interna da peça de betão armado. Quer isto dizer que, através da radiação que atravessa a peça de betão armado, sendo que essa radiação é emitida de um dos lados do elemento e recebida do lado oposto por um filme fotográfico apropriado, consegue-se obter uma espécie de raio X que permite conhecer a estrutura interna do elemento em análise. De salientar que nestas técnicas são utilizados materiais radioativos, pelo que, deve ser elevado o cuidado que o técnico deve ter, bem como a experiencia do mesmo, sendo que muitas vezes é mesmo necessário obter licença para a sua realização [4].

Quando se faz uma análise aprofundada a um elemento de betão armado, por vezes não basta apenas saber a localização das armaduras, ou o seu número e a sua disposição, mas também são necessárias informações acerca do estado de conservação das mesmas. Saber detalhes acerca da corrosão é muito importante pois pode estar em causa a segurança da estrutura, sendo necessário intervir de imediato. Os métodos eletromagnéticos permitem obter informações relevantes sobre o tipo e as condições em que se encontram as armaduras dentro do betão. O grau de corrosão é conseguido quando são empregues os métodos de polarização,

enquanto o conhecimento da localização e do recobrimento das armaduras é dado pelo uso de pacómetros (Fig. 3.4).



Figura 3.4 – Detecção das armaduras com a utilização do pacómetro [32].

No que respeita à temática da absorção e permeabilidade nas estruturas, pode referir-se que quanto maior a sua capacidade resistente à entrada da água, mais elevada será a sua vida útil, pois com a incursão da água nos elementos de betão, entram também cloretos, sulfatos e ainda dióxido de carbono que vão contribuir para a sua degradação. Assim, uma boa escolha do material a utilizar, consoante o local de aplicação do mesmo, reduz a probabilidade de degradação precoce através destes mecanismos. Contudo, há a necessidade da análise da capacidade que os elementos de betão têm para resistir à entrada desses agentes de deterioração e para isso são aplicadas técnicas nas superfícies dos elementos estruturais. Nesses testes são avaliados mecanismos tais como: a absorção, que se traduz pela entrada de água nos elementos de betão, na maior parte das vezes por capilaridade; a penetração de fluidos através dos poros; e a difusão, relacionada com a deslocação que certas substâncias dos ambientes de maior concentração para os de menor [2].

Já os ensaios de termografia caracterizam-se pela utilização de raios infra vermelhos para observar a distribuição de temperatura e medir a mesma. A técnica consiste na perceção superficial da temperatura de um elemento estrutural pela irradiação de calor desse mesmo elemento, através de material adequado ao ensaio, convertido em papel e posteriormente impresso, cujas diferenças de cores que aparecem na imagem caracterizam os diferentes intervalos de temperatura. Permite ainda detetar alguns defeitos, assim como delaminações no betão armado [4].

Quando se pretende analisar parâmetros como resistência e deformabilidade recorre-se a métodos *in situ*, tais como: esclerómetro, que mede a dureza superficial; método da medição da resistência à penetração; métodos baseados nos conceitos de maturidade; ensaios de arranque; ensaios de tração; entre outros. Pelos pequenos danos que podem provocar na estrutura, danos esses facilmente reparáveis, estes ensaios são considerados semi-destrutivos.

A versatilidade da sua utilização é uma mais-valia, pois estes parâmetros tanto podem ser avaliados enquanto a estrutura está a ser construída como mais tarde, quando esta já tem alguns anos de vida. Contudo, de salientar que a metodologia é diferente em cada um dos casos. Mas esta não é a única vantagem: os reduzidos custos e a relativa simplicidade de interpretação dos resultados, já que estes são recolhidos em forma de índices e/ou parâmetros e depois transformados através de correlações para posterior avaliação. A rapidez e facilidade na execução têm também um peso significativo na hora da escolha do ensaio a realizar [28].

Deste grupo de ensaios não destrutivos também fazem parte os ensaios dinâmicos. Com o objetivo de analisar o comportamento das estruturas, os acelerómetros, aparelhos utilizados nestes processos, vão medir as frequências de vibração das estruturas em análise. Todavia, não é simples a realização destes ensaios em estruturas com alguns graus de liberdade e rigidez desconhecida, como em edifícios antigos. Mas quando estes ensaios são usados em edifícios com rigidez estrutural conhecida e com poucos graus de liberdade esta técnica é bastante eficiente.

Por último, de salientar outro método que se encaixa neste grande grupo de ensaios, a fotogrametria. Com esta técnica é possível analisar um elemento, através da fotografia, isto é, é possível criar uma imagem tridimensional, através de várias fotografias (bidimensionais) tiradas de diferentes ângulos, ao mesmo objeto. Nesta técnica é necessário o uso de equipamento específico como máquinas fotográficas de alta precisão, computador com programas adequados de fotogrametria e desenho, entre outros. O formato da imagem também é um pormenor bastante relevante, já que quanto maior este for, mais detalhes terá a fotografia permitindo assim uma análise mais pormenorizada e eficaz [4].

Todos os ensaios abordados neste sub-capítulo serão descritos em mais pormenor no Capítulo 4 desta dissertação.

### 3.4.3 Ensaios Destrutivos

Os ensaios destrutivos conferem à estrutura um certo grau de destruição, por isso a sua aplicação é limitada. Este tipo de ensaios, elaborados in situ, são normalmente efetuados em paredes de alvenaria, em edifícios sem possibilidade de recuperação, e a sua execução serve apenas para conhecimento científico, nomeadamente, para obter informações acerca das soluções estruturais e das técnicas utilizadas, geralmente quando estas são mais antigas e desconhecidas (Fig. 3.5) [2].

Pela impossibilidade de aplicação em edifícios em funcionamento, os testes que são feitos ao betão e que o deixam inutilizável são elaborados em laboratório. Existem inúmeros ensaios deste tipo, em que é retirada uma amostra para mais tarde ser ensaiada. São exemplos os ensaios de tração, de compressão, de flexão [4].



Figura 3.5 – Ensaio destrutivo – carotagem. [33]

#### 3.4.4 Monitorização

Depois de realizada a análise visual e os ensaios, o técnico pode optar pela monitorização dos elementos estruturais sempre que a informação recolhida suscite dúvidas, ou não permita tirar todas as conclusões necessárias acerca da origem da patologia. A monitorização de uma estrutura baseia-se no acompanhamento da evolução de uma certa patologia ao longo de determinado tempo com o objetivo de recolher informações mais precisas acerca do que fenómeno que está a ocorrer. Um controlo sucessivo de alguns danos, tais como os desníveis ou a abertura de fendas, podem ajudar na análise do comportamento de um edifício. O técnico pode recorrer a este processo para obter informações sobre a segurança ou durabilidade da edificação, no entanto, o mais comum é utilizá-la para conseguir informações mais detalhadas de anomalias que a construção possa ter, para posteriormente realizar um diagnóstico mais fidedigno [2].

A monitorização de uma estrutura de betão armado permite ao técnico recolher informações acerca: do comportamento da estrutura, analisando diretamente as ações que lhe são impostas, como ações acidentais, a força do vento, do sismo, a temperatura, e a reação da estrutura quando são aplicadas essas ações. A monitorização é também útil para acompanhar o desempenho da construção ao longo de uma intervenção, nomeadamente, em edifícios com alguma importância histórica, para assim se identificar as suas fragilidades e planear uma manutenção eficaz. Os sensores devem ser precisos, estar estabilizados e devem ser colocados na estrutura sem causar qualquer tipo de dano estético ou que prejudique a funcionalidade do edifício.

Por norma, na monitorização são avaliadas as deformações, a largura das fendas, as variações de humidade e temperatura, as rotações da estrutura, os movimentos das juntas, as tensões, os assentamentos, entre outros parâmetros. Consoante o objetivo pretendido, o técnico decide por quanto tempo a estrutura vai ser monitorizada.

Dependendo de fatores como as condições in situ, a rapidez e facilidade em obter resultados e o capital disponível, o técnico vai optar pela monitorização manual ou pela monitorização

automática. No primeiro caso, são usados aparelhos amovíveis, cuja comparência periódica do avaliador é crucial, pois os instrumentos são de leitura manual. Esta técnica torna-se menos dispendiosa a nível económico [4]. Já no que respeita à monitorização automática, são utilizados equipamentos mais sofisticados, que permitem a gravação dos dados obtidos, bem como a possibilidade de os visualizar quando pretendido. Estes sistemas possibilitam a avaliação da integridade da edificação e permitem um acompanhamento continuado da evolução da patológica ou de outros parâmetros. Para além dos dados fornecidos serem em elevado número, a monitorização automática facilita a compreensão dos mesmos, uma vez que se consegue visualizar logo a informação, e esta pode servir de alerta para o técnico quando se excede algum limite nos parâmetros avaliados [2].

Para que todo este processo decorra como esperado, o técnico tem de planear e definir objetivos. É muito importante que este saiba exatamente o que vai avaliar, qual o tipo de monitorização a utilizar, de maneira a saber quais são os instrumentos necessários para essa avaliação, quais as possíveis respostas da estrutura às solicitações, quais os resultados esperados, e qual o tempo necessário para fazer a monitorização [4]. Também a escolha do local exato, no elemento a monitorizar, deve ser um fator a ter em conta. Locais propícios a ficar em piores condições devido a ação dos agentes de degradação, devem ser privilegiados na hora da escolha. Portanto, o tipo de monitorização, assim como o tempo de duração da mesma ou a modificação das condições de funcionamento da estrutura são critérios a ter em consideração neste processo.

Como já foi referido, muitos são os parâmetros possíveis de avaliar através da monitorização. Alguns deles prendem-se com as próprias ações estruturais, e outros estão relacionados com o meio ambiente. Relativamente aos primeiros, esta técnica permite avaliar todo o tipo de tensões nas zonas que são mais críticas; a existência de fendas e qual a sua variação ao longo do tempo; os deslocamentos horizontais e verticais existentes na estrutura, assim como as rotações e os assentamentos nas fundações, e os movimentos existentes nas juntas. É possível ainda obter informações sobre a temperatura no local de aplicação, a radiação solar incidente e a humidade presente na zona a avaliar [4].

Todos estes dados são possíveis de obter graças à tecnologia envolvida. Com o desenvolvimento tecnológico contínuo, e consequente melhoramento do equipamento utilizado, quer a nível de hardware, quer de software, os dados conseguidos têm cada vez mais rigor. Os sensores e os conversores analógicos ou digitais tornam-se cada vez mais pequenos, o que torna mais flexível a sua aplicação; os meios de armazenamento da informação têm cada vez mais capacidade e permitem guardar grandes quantidades de informação; e os meios de transmissão de dados são mais eficazes e permitem um controlo da monitorização à distância [2].

### **3.5 Análise de dados e Diagnóstico**

A análise de todos os dados recolhidos é a fase que se segue. Depois da realização de todos os ensaios, destrutivos ou não destrutivos, e da obtenção da informação dada pelos mesmos, é

necessária uma análise objetiva e criteriosa. Desvendar a causa que deu origem a cada dano torna-se assim imprescindível. O técnico responsável que vai desenvolver trabalho necessita de um conhecimento aprofundado não só, no que respeita ao comportamento estrutural, mas também, acerca de todos os materiais e das suas reações quando submetidos a diversos fatores de degradação.

Depois de um estudo exaustivo do que pode estar na base de todas estas anomalias, passa-se então à fase do diagnóstico. Nesta etapa procura-se fundamentar todos aqueles processos que originaram os danos detetados nas estruturas de betão armado e arranjar soluções para a sua reabilitação. Contudo, existe sempre a possibilidade do diagnóstico não ser o mais correto, havendo de novo o processo de desenvolvimento das patologias, mesmo depois da estrutura ter sido reabilitada [23].

### 3.6 Fase de Prognóstico

Por vezes, logo após o técnico responsável pela avaliação fazer a escolha da medida interventiva, e antes que esta seja efetivamente aplicada, é essencial haver um período de controlo da anomalia. Tem-se então a fase de prognóstico, que pressupõe um acompanhamento do processo patológico ao longo do tempo. Este procedimento possibilita um estudo mais alongado do problema, permitindo a recolha de mais e importantes dados, para se perceber quais são realmente as causas, e se foi elaborado um diagnóstico correto.

Este procedimento, por norma, é utilizado em situações mais complexas, ou seja, em danos já recorrentes. Assim, ao invés de mais uma reabilitação errada, pode finalmente obter-se uma solução definitiva. Às vezes este procedimento é indispensável para a análise de custos. Por exemplo, quando se analisa o processo evolutivo da anomalia e conclui-se que esta tende a piorar mesmo depois das intervenções [23].

### 3.7 Ficha de Recolha de Dados

A ficha de recolha de dados é de extrema importância para registar todas as características da estrutura em análise. De seguida apresenta-se um exemplo de uma ficha de recolha de dados [20]:

1. Identificação do Edifício Ref.<sup>a</sup>: \_\_\_\_\_

Identificação do Edifício: \_\_\_\_\_

Motivo de Inspeção: Reclamação \_\_ Inspeção de rotina \_\_ Outro \_\_

Inspeção realizada por: \_\_\_\_\_ Hora: \_\_:\_\_ Data: \_\_/\_\_/\_\_



## 2. Identificação de danos observados

### 2.1 Caracterização do local onde ocorreu anomalia

Identificação do local: \_\_\_\_\_

Elemento/ Componente estrutural: \_\_\_\_\_

Intervenções anteriores: \_\_\_\_\_ Responsável: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Responsável: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Responsável: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Responsável: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Uso do edifício: \_\_\_\_\_

### 2.2 Identificação das anomalias

Tipo de dano:

Humidade \_\_ Erosão \_\_ Deformação \_\_ Fendas \_\_

Fissuras \_\_ Corrosão \_\_ Desprendimentos \_\_ Oxidação \_\_

Eflorescências \_\_ Organismos \_\_ Sujidade \_\_

Descrição do dano: \_\_\_\_\_

Observação visual da envolvente:

O dano é localizado? \_\_\_\_\_

Extensão aproximada: \_\_\_\_\_

Esquema da anomalia:

Existem outras anomalias? Sim \_\_ Não \_\_

Descrição: \_\_\_\_\_

História:

Data em que surgiu: \_\_\_\_\_ Como evoluiu: \_\_\_\_\_

Aparece e desaparece em ciclos? \_\_\_\_\_

### 2.3 Detalhes Construtivos

Documentação existente:

Peças escritas: \_\_\_\_\_

Peças desenhadas: \_\_\_\_\_

Descrição do tipo de Estrutura:

Betão aramado \_\_ Alvenaria \_\_ Madeira \_\_ Metálica \_\_

Descrição do sistema estrutural existente: \_\_\_\_\_

## 2.4 Caracterização Ambiental

Localização do dano:

Na vertical: \_\_\_\_\_

Na horizontal: \_\_\_\_\_

Orientação do dano: \_\_\_\_\_

Nível de exposição:

H (altura do dano, em relação à rua) \_\_\_\_\_

D (distância em relação aos edifícios, situados em frente) \_\_\_\_\_

Nível de contaminação: \_\_\_\_\_

1 – alto; 2 – médio; 3 - Baixo

Observação: Necessidade de anexar fotografias ao modelo

## 3. Identificação do Mecanismo de Deterioração

Identificação da causa da deterioração:

Caso particular

Necessária a intervenção de um técnico especializado

Observações: \_\_\_\_\_

Caso tipificado

Dar por concluído o diagnóstico

Observações: \_\_\_\_\_

Proceder a inspeção detalhada

Inspeção específica a realizar: \_\_\_\_\_

Locais de realização de ensaios: \_\_\_\_\_

Urgência de intervenção: \_\_\_\_\_

Requer apenas manutenção

Data da próxima inspeção visual \_\_/\_\_/\_\_

Observações: \_\_\_\_\_

Data: \_\_/\_\_/\_\_ O técnico: \_\_\_\_\_



## 4. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO EM ESTRUTURAS DE BETÃO

### 4.1 Enquadramento

As estruturas de betão armado a certa altura da sua vida útil começam a desenvolver patologias, devido a uma deficitária manutenção das edificações, juntamente com defeitos vindos da parte de projeto ou da exposição a agentes agressivos de deterioração. Com a multiplicidade de combinações, entre os diferentes tipos de materiais e os variadíssimos fatores de degradação, é gerada uma enorme possibilidade de patologias, sendo muitas vezes difícil descobrir a causa do seu aparecimento.

Por vezes, a intervenção é necessária para acautelar a expansão dos danos, e assim evitar consequências mais graves. Mas, antes do começo da intervenção o técnico tem de conhecer muito bem toda a estrutura, todos os materiais utilizados na construção, assim como os pormenores construtivos da mesma. A análise da documentação referente ao mesmo é uma mais-valia mas a inspeção visual do edifício é sempre necessária. A documentação sobre a construção pode fornecer dados para o especialista estabelecer o plano de inspeção.

Alguns autores defendem que a boa caracterização dos edifícios deve cumprir os seguintes passos: i) a recolha de toda a informação escrita e desenhada acerca da estrutura, pois permite ter visão global do problema e definir o que falta saber; ii) inspeção e realização de ensaios. Após a reunião de todos estes dados, quer as pormenorizações construtivas, quer os dados recolhidos através dos ensaios, muitas vezes torna-se importante voltar a calcular as ações da estrutura, e efetuar uma análise estrutural, uma vez que se podem verificar danos resultantes da aplicação de ações que não foram contabilizadas em projeto e que estão a prejudicar o bom funcionamento da obra [2].

O foco neste capítulo vai para todo o tipo de ensaios, não destrutivos, semi destrutivos, que se podem realizar nas estruturas de betão, a fim de obter toda a informação necessária para a construção de uma boa estratégia de reabilitação.

### 4.2 Ensaios in Situ

A necessidade de conservação e reabilitação das estruturas que apresentam danos leva cada vez mais, à utilização de técnicas eficazes de recolha e tratamento de dados, a fim de se solucionar da melhor maneira o problema encontrado. Os ensaios realizados nas estruturas são fundamentais para avaliar o seu estado de conservação. Estes podem ser realizados nos próprios elementos estruturais, os chamados ensaios *in situ*, ou posteriormente em laboratório.

Assim, os ensaios realizados *in situ* podem dividir-se em três grandes grupos, sendo que os mais comuns são os primeiros dois:

- 
- Ensaios não destrutivos
  - Ensaios semi destrutivos
  - Ensaios destrutivos

Como forma de complementar a inspeção visual, acrescentando relevantes informações, este tipo de ensaios permite obter informações acerca [34, 35]:

- Dos materiais usados na estrutura;
- Das condições dos elementos em análise;
- Dos mecanismos que contribuem para a degradação;
- Do desempenho estrutural.

Apesar de toda a sua utilidade, a realização dos ensaios não apresenta só vantagens. Muitas das vezes, quando são detetadas as anomalias, estas já se encontram num elevado grau de deterioração que pode comprometer a segurança da edificação, e daí ser necessária uma análise detalhada, que transmita resultados o mais rápido possível. Contudo, este tipo de ensaios pode comprometer essa rapidez, pode haver demora na obtenção dos resultados e assim aumentar o tempo que o técnico demora para fazer o diagnóstico e planear a intervenção. Outro dos senãos prende-se com a obtenção de resultados difíceis de interpretar. Quer isto dizer que, quando o inspetor não tem informações acerca da estrutura, ou seja, não conhece quer os pormenores construtivos, quer os materiais utilizados na construção, a análise dos resultados obtidos é feita com base em suposições, que podem ou não estar de acordo com a realidade, e isso pode pôr em causa a resolução eficaz do problema [36]. Apesar das limitações, as mais-valias são mais importantes e sem dúvida que a realização de ensaios é importante para impedir que se cometam falhas grosseiras na fase de diagnóstico.

Com a diversidade de informação que se pode retirar dos ensaios *in situ*, é extremamente complicado conseguir agrupá-los num conjunto específico. No entanto, apresenta-se uma classificação como indicado na Figura 4.1.

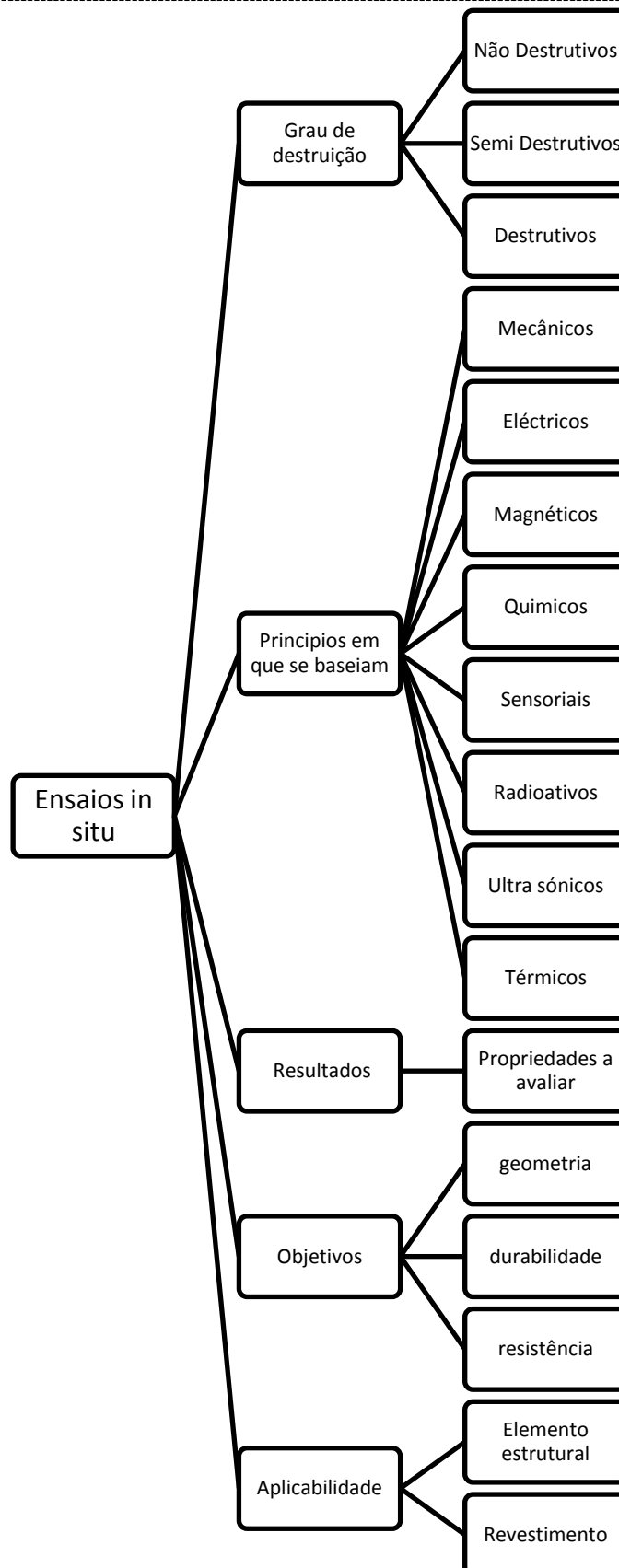


Figura 4.1 – Várias formas de agrupar os ensaios *in situ* [adaptado de [37]].

## 4.2.1 Ensaios Não Destrutivos e Semi Destrutivos

### 4.2.1.1 Ensaio do Esclerómetro

Já há muito que se utiliza o ensaio do esclerómetro para medir a dureza superficial. Alguns autores arriscam que esta técnica teve início no ano de 1930. Nessa altura não seria utilizada exatamente da mesma maneira que é hoje, uma vez que as medições eram realizadas com base no retorno de uma esfera de aço que estaria fixa num pêndulo, mais tarde passou a ser projetada por uma pistola, mas o princípio estava lá. O Princípio do Ricochete consiste na teoria de que “o retorno de uma massa elástica depende da dureza da superfície onde ela choca” [28].

Este ensaio de diagnóstico não destrutivo mede a dureza superficial dos materiais, através do recuo de uma massa que colide com a superfície em análise. Esta grandeza é então transformada, pela consulta de ábacos, num valor de resistência do material à compressão [38].

Com este tipo de ensaios, não só se conseguem obter valores de resistência superficial como também é possível adquirir informações acerca da homogeneidade do material em análise. Ainda mais, o técnico da inspeção verifica logo a existência ou não da resistência mínima da peça em questão, o que lhe permite ter uma visão acerca segurança da construção. Este ensaio permite definir a necessidade, ou não, de exames complementares. Salienta-se ainda que este ensaio não retira a necessidade de se realizarem de ensaios laboratoriais para a determinação da tensão de rotura à compressão [2].

- Equipamento

Estes ensaios são maioritariamente elaborados em elementos de betão. O equipamento indicado para a realização dos mesmos é o esclerómetro do tipo Schmidt, como se observa na Figura 4.2.

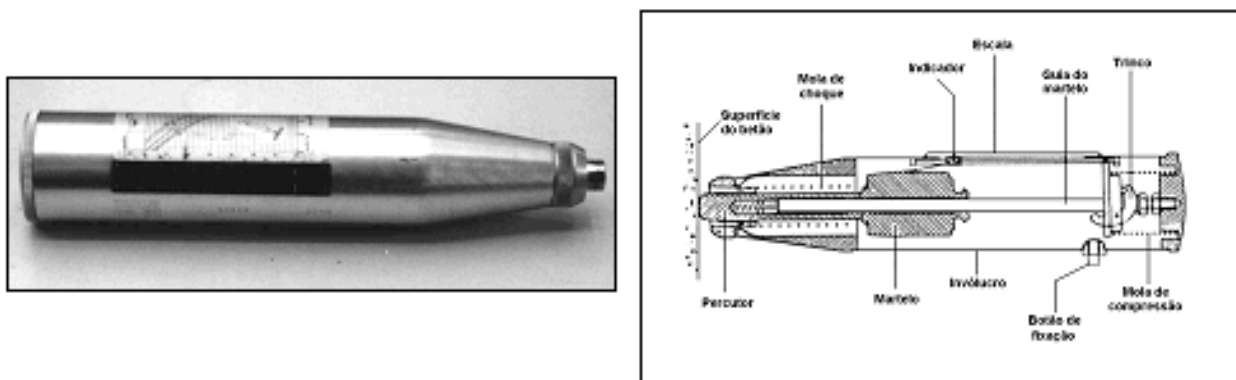


Figura 4.2 – Constituição do esclerómetro do tipo Schmidt [2].



O esclerómetro do tipo Schmidt funciona de uma maneira muito simples. O veio de compressão do esclerómetro é pressionado sobre a parede de betão a analisar, e a mola existente no seu interior vai comprimir. Depois do veio ser comprimido até à sua totalidade, é imediatamente libertada uma massa que embate na sua extremidade interior, cujo choque é descarregado para o elemento que o técnico está a ensaiar, que ao reagir, estimula um ressalto. Esse ressalto vai ser recebido pelo veio, que o transmite à massa que anteriormente lhe embateu no interior do esclerómetro, e que, por sua vez, provoca a deslocação do ponteiro, existente também no aparelho, medindo o máximo valor do ressalto da massa (Fig. 4.3). Esse valor será maior, quanto maior foi a dureza superficial do elemento em análise. O aparelho fornecerá um valor, o índice esclerométrico, que será convertido, através de ábacos, num valor da resistência à compressão do betão. Este também pode variar consoante o ângulo formado pelo eixo longitudinal do aparelho e a superfície da peça a ser analisada [2].

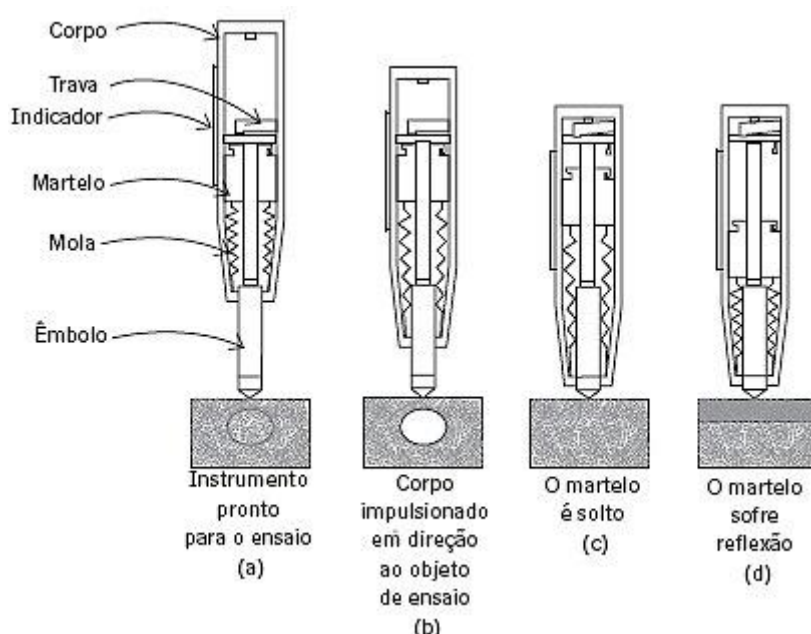


Figura 4.3 – Funcionamento do esclerómetro tipo Schmidt [39].

- Procedimento

Imediatamente antes do começo do ensaio é de extrema importância a calibração do esclerómetro. Para isso, o inspetor necessita de uma bigorna de calibração de aço, como representada na Figura 4.4. O ensaio é realizado contra a superfície da bigorna, em que, o resultado obtido vai ser comparado a um valor de referência, fornecido nas fichas técnicas do aparelho [40].



Figura 4.4 – Bigorna de calibração de aço do esclerómetro de Schmidt [41]. Calibração do esclerómetro [42].

Apesar do ensaio ter um modo de funcionamento simples pode-se dividir o processo por etapas.

1. **Preparação da Superfície de Ensaio.** É preciso ter especial cuidado com a superfície a ser ensaiada. A norma NP EN 12405:2 (IPQ 2012) obriga a que este ensaio seja realizado numa superfície lisa. Como se sabe, a superfície de betão pode ser bastante irregular e, por isso, o técnico deve começar por transformar a área de ensaio rugosa, numa face lisa. Para isso, deve munir-se de ferramentas apropriadas, neste caso, o uso de pedra abrasiva seria o apropriado para essa transformação. Para além disso, há que ter especial atenção, a ensaios realizados em elementos com elevada porosidade, bem como em superfícies humedecidas, pois podem comprometer os resultados.
2. **Área a ensaiar.** Nesta etapa, o técnico vai seleccionar a área a ensaiar. O elemento deve ter pelo menos 5 cm de profundidade, segundo alguns autores [2]. Quanto às dimensões dessa área, devem estar compreendidas entre 30 cm de largura e outros 30 cm de comprimento, sendo que tem de haver um afastamento mínimo de 2,5 cm entre locais de impacto (Fig. 4.5).



Figura 4.5 – Ensaio com o esclerómetro de Schmid, afastamento entre zonas de impacto [43, 44].

3. **Uso do esclerómetro tipo Schmidt.** Reunidas todas as condições iniciais, o técnico está agora preparado para iniciar o ensaio propriamente dito. Como já referido anteriormente, o uso do esclerómetro é bastante simples. Este é pressionado contra a zona a ensaiar, tendo sempre a atenção para que o aparelho faça uma perpendicular com a superfície em análise. Depois de registada a leitura, este passo é repetido para cada um dos pontos estipulados anteriormente [45].
4. **Término do ensaio.** No final do processo, é imprescindível a descompressão da mola do esclerómetro. Uma vez comprida, esta apenas volta à forma inicial se for efetuada a sua descompressão. A partir daqui, o técnico repete o ensaio quantas vezes forem necessárias. De salientar também que, caso se verifique uma degradação superficial do elemento a ensaiar, depois do referido ensaio, este tem de ser repetido pois os resultados podem não estar de acordo com a realidade.

- Fatores que influenciam os resultados do ensaio do esclerómetro

Por muito que se tentem cumprir todas as regras ditadas na norma, muitas das vezes há fatores externos que podem colocar todo o ensaio em causa e devem merecer toda a atenção do técnico. Em situações em que há a presença de humidade, ou onde se verifica a diminuição da aderência, ou mesmo em locais de descontinuidades, os valores correspondentes ao índice esclerométrico podem ser bastante reduzidos, ou até mesmo nulos, nos casos onde se verifica um alto nível de degradação do elemento a ensaiar. Uma superfície irregular contribui igualmente para a dispersão de resultados, uma vez que o ensaio mede apenas a dureza superficial e não em profundidade [46].

Os fatores que influenciam os valores do ensaio do esclerómetro apresentados de forma mais detalhada [46]:

- **As superfícies irregulares:** a obrigatoriedade no alisamento das superfícies não é em vão, muito pelo contrário. Para não haver uma discrepância entre os resultados obtidos e o que são na realidade, é imposto que o ensaio se faça em superfícies lisas;

- ***O teor de humidade dos elementos de betão***: sabe-se, por ensaios em provetes, que os resultados variam com o teor de humidade.
- ***O tipo de cimento utilizado para a realização das construções em análise***: como é de prever, a resistência do betão depende muito do tipo de cimento utilizado na construção. Assim, o índice esclerométrico é tanto maior quanto maior for a resistência do cimento usado;
- ***O tipo de agregados usados na mistura***: nos betões com agregados de grandes dimensões é necessário um especial cuidado aquando da realização deste tipo de ensaios, uma vez que, caso calhe um ensaio próximo de um desses agregados os valores do mesmo podem ficar inflacionados. Sabe-se, por exemplo que, quando são utilizados agregados de origem calcária, o valor do índice esclerométrico é relativamente mais baixo comparativamente com os betões com os agregados de origem granítica;
- ***A idade dos elementos a ensaiar***: estes ensaios não devem ser realizados em betões com menos de 3 dias de idade, ou que tenham um valor de resistência à compressão inferior a 7 MPa, pois os valores do índice esclerométrico podem ser demasiado reduzidos.
- ***A carbonatação do betão***: com a idade o betão começa a ficar carbonatado. Por consequência, a sua resistência mecânica aumenta, fazendo com que aumente igualmente o índice esclerométrico. Alguns autores afirmam que este aumento pode rondar os 50%.
- ***A movimentação dos elementos de betão onde são efetuados os ensaios***: este tipo de ensaios devem ser efetuados em peças fixas. Caso isso não aconteça pode verificar-se a diminuição dos valores obtidos.

Para concluir, de reforçar que para além de ser um ensaio não destrutivo, a sua facilidade e rapidez de execução são também uma mais-valia. Relativamente aos custos, pode dizer-se que são bastante reduzidos, comparativamente a outros ensaios. Contudo, a fiabilidade dos resultados poderia ser bastante superior, uma vez que, qualquer pormenor pode afetar os valores.

#### 4.2.1.2 Técnicas cuja base é a Teoria da Propagação de Ondas

##### Ensaio de Ultra-sons

Conforme a norma NP EN 12504:4, este tipo de ensaios serve para determinar a velocidade de propagação das ondas longitudinais ultrassónicas nas estruturas de betão, com o auxílio de um aparelho próprio de medição (Fig. 4.6). Tanto se podem realizar *in situ*, em elementos de betão, como em laboratório, em provetes de betão. Através da informação que disponibilizam é possível determinar a uniformidade da peça em análise, a existência de fendas, de vazios, a qualidade, o módulo de elasticidade do betão, assim como a avaliar as discrepâncias das propriedades ao longo de determinado espaço de tempo [46].



Figura 4.6 – Aparelho utilizado no ensaio de ultra sons [47].

Este aparelho fornece informação acerca do quanto demoram as ondas a atravessar o material em ensaio, o que torna possível saber as suas particularidades e por conseguinte avaliar o desempenho [48]. Sabe-se que os primeiros ensaios com ultra sons ocorreram por volta do ano de 1940, pela realização de Obert. Com o passar dos anos, a técnica foi sendo aperfeiçoada, e por volta de 1970 houve atualização do software, levando à elaboração de equipamentos portáteis, mais fáceis de transportar e de leitura digital, muito semelhantes aos usados hoje em dia. [40]

Tendo por base o princípio da propagação de ondas, este ensaio permite medir a velocidade de propagação dessas mesmas ondas, e os seus valores vão depender das propriedades elásticas do meio que atravessam. São emitidas vibrações acústicas cuja origem é igual à do som, apenas com maior frequência. Essas vibrações traduzem-se em ondas de três tipos diferentes: as de compressão (P), as de corte (S) e as Rayleigh (R), sendo as ondas de compressão as que mais facilitam a obtenção dos resultados obtidos, devido à sua velocidade de propagação e devido à forma como agitam as partículas dos materiais [49].

- Procedimento

Segundo a norma NP EN 12504:4, o material imprescindível para a realização do ensaio é o seguinte: dois transdutores, um gerador de ondas ultra sónicas; gel para utilizar nos transdutores.

Tal como na maioria dos ensaios, antes do seu começo é preciso calibrar os equipamentos a utilizar. Para isso, e neste caso, utiliza-se uma barra de liga, cujas propriedades são conhecidas (Fig. 4.7). O técnico tem de fazer corresponder os valores, quer o de referência da barra de liga, quer o que lê o mostrador digital, usando para isso o botão que faz o ajuste do equipamento [49].

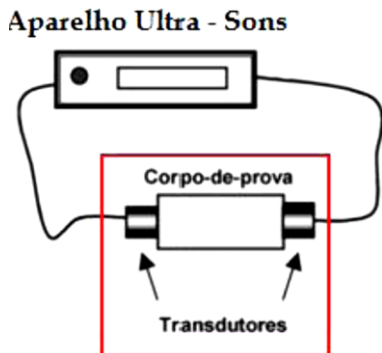


Figura 4.7 - Esquema de simulação da calibração do equipamento [49].

O ensaio baseia-se na colocação de dois transdutores, um emissor e um recetor, em duas faces distintas do elemento de betão em análise. O transdutor emissor vai enviar um impulso ultrassónico que percorre a peça até ser recebido pelo transdutor recetor (Fig. 4.8). Os transdutores estão ligados a um circuito eletrónico, que oscila graças aos impulsos elétricos do circuito. Esses impulsos vão ser utilizados pelo transmissor e transformados em ondas que entram em contacto com a superfície em ensaio e depois são recebidas pelo recetor, que transforma novamente essas ondas em impulsos elétricos [46].



Figura 4.8 – Ensaio de Ultra sons [50].

A velocidade de propagação das ondas é obtida através do tempo que a onda vai gastar para ir do transdutor transmissor até ser recebida pelo transdutor recetor, cujo valor vai estar explícito no aparelho de ultra sons. Na Figura 4.9 pode observar-se um visor de um desses aparelhos, com os valores de leitura [48].

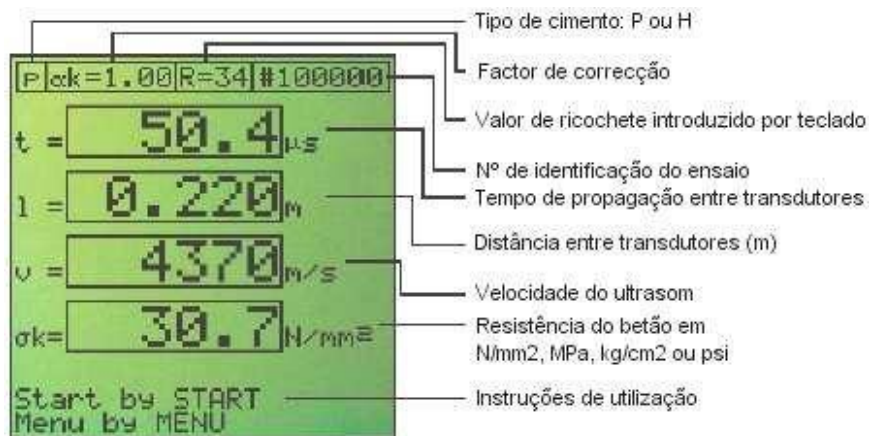


Figura 4.9 – Resultados obtidos de um ensaio de Ultra sons [47].

À semelhança de outros ensaios, neste também a superfície a ensaiar tem de se encontrar totalmente lisa. Caso isso não se verifique, e exista rugosidade, os valores de velocidade de propagação das ondas não vão ser os corretos, pois o atrito existente nas superfícies de contacto torna-se bastante prejudicial. Porém, e para ser ainda mais fácil essa transmissão, é colocado um produto de ligação, como por exemplo, vaselina, massa lubrificante, sabão líquido.

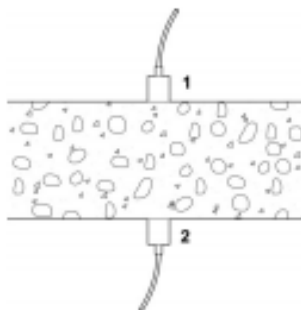
A norma NP EN 12504:4 prevê que a distância entre transdutores dependa da dimensão máxima dos agregados utilizados naquele betão. Caso se verifique que a máxima dimensão do agregado presente no betão a ensaiar seja inferior a 20 mm, a distância mínima entre transdutores deverá ser de 100 mm. Por outro lado, se a máxima dimensão dos agregados estiver compreendida entre os 20 e os 40 mm, então a distância mínima entre transdutores deverá ser de 150 mm.

Quanto à posição dos transdutores, a norma NP EN 12504:4 refere que há três tipos de leituras possíveis:

- **Direta:** neste método os transdutores colocam-se frente a frente, mas em faces opostas do elemento a ensaiar (Fig. 4.10). As ondas vão ser transmitidas conforme a direção normal o que proporciona maior rigor na medição da distância da onda, por conseguinte permite obter valores mais corretos [40];
- **Semi direta:** nesta situação, os transdutores já estarão em faces perpendiculares da peça (Fig. 4.11). Segundo alguns autores, o método fornece corretamente os dados, tal como no método direto, contudo há que ter em atenção o afastamento entre os transdutores e não deixar que este se torne excessivo, para não comprometer os valores. Usa-se frequentemente em situações em que não se pretende encontrar armadura, ou seja, em cantos de pilares ou de vigas [46];

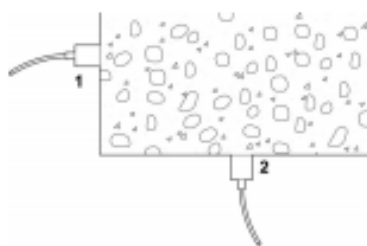


- **Indireta:** utilizada principalmente em pavimentos e lajes de betão, em que uma das faces é inacessível. A norma NP EN 12504:4 aconselha apenas o recurso a este método nestas situações. Aqui os transdutores encontram-se na mesma face do elemento de betão (Fig. 4.12).



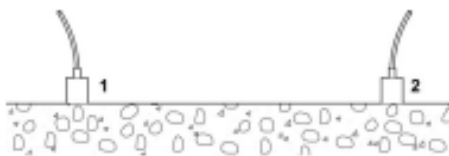
**Transmissão directa**

Figura 4.10 – Método de transmissão direta no ensaio de Ultra-sons [45].



**Transmissão semi directa**

Figura 4.11 – Método de transmissão semi direta do ensaio de Ultra-sons [45].



**Transmissão indirecta ou superficial**

Figura 4.12 - Método de transmissão indirecta ou superficial do ensaio de Ultra-sons [45].



- Fatores que influenciam os resultados do ensaio de Ultra-sons

Neste ensaio, os resultados obtidos, ou seja, a velocidade de propagação das ondas, dependem maioritariamente do material constituinte do elemento em análise. E à semelhança com outros ensaios, sobre este também tem influência aspetos que se prendem com a natureza do material e as condições do meio em que este se encontra, bem como, da forma como o técnico realiza o ensaio. Todas estas particularidades vão afetar e dificultar na avaliação dos resultados recolhidos [48]. Os principais atores que influenciam os resultados do ensaio de Ultra-sons são:

- **Dimensão e tipologia do agregado:** alguns autores garantem ser de extrema importância, estas duas características, pois a velocidade de propagação das ondas vai variar consoante a natureza e dimensão do agregado utilizado na construção [46];
- **Temperatura do elemento em análise:** Para temperaturas que não estejam compreendidas entre 10 e 30 graus, a velocidade de propagação das ondas tem tendência a aumentar ou diminuir, consoante a temperatura seja inferior ou superior, respetivamente [46];
- **Humidade do betão:** neste caso, a velocidade aumenta quanto maior for o teor de humidade presente no betão. Contudo, alguns autores citam que com o passar dos anos, a humidade no betão vai diminuindo graças às reações de hidratação do cimento [40];
- **Percursos das ondas:** O comprimento que as ondas ultrasónicas vão percorrer deve ser longo quanto baste para não se deixar influenciar pelo material constituinte do elemento a ensaiar, isto é, não dar resultados apenas com base no tipo de agregado, ou no cimento que foi utilizado na constituição da mistura. Contudo, há que prever uma distância máxima, segundo alguns autores, de até 3 metros, que dependerá também muito da capacidade do aparelho do ensaio [40];
- **Grau de compactação:** para uma compactação insuficiente, tem-se uma reduzida densidade do betão, o que faz diminuir a velocidade de propagação das ondas ultrasónicas [46];
- **Uso de adições:** a utilização de aditivos na composição do betão vai influenciar este ensaio [46];
- **Relação água/cimento:** Com o aumento desta relação, verifica-se a diminuição consequente da resistência do betão à compressão, bem como da sua densidade, o que conduz à diminuição da velocidade de propagação das ondas ultrasónicas [46];
- **Presença de descontinuidades:** Fendas ou excesso de vazios vão igualmente interferir nos resultados do ensaio. Por norma, quanto maior for o estado de degradação do elemento em análise, mais tempo demorará a onda a percorrer a distância [48];
- **Presença de armaduras:** em elementos cuja presença de armaduras é uma realidade a norma NP EN 12504:4 aconselha que se evitem estas áreas, em particular quando as armaduras estiverem numa posição perpendicular à direção de propagação das ondas

ultra sónicas. Este tipo de ondas tem uma velocidade de propagação bastante grande em elementos metálicos, daí a necessidade de evitar as mesmas, pois comprometeria em muito os resultados obtidos [49].

### Ensaio Impacto – Eco

Com o objetivo de detetar e analisar descontinuidades internas nas estruturas de betão, este ensaio consiste na aplicação de um impacto na superfície da peça a ensaiar. Esta perturbação contribui para a propagação de três tipos de ondas: as Rayleigh (ondas R), as de compressão (ondas P) e as de corte (ondas S) [4].

O princípio deste ensaio é bastante simples, as ondas transmitidas pelo impacto quando encontram descontinuidades, fendas, vão ser refletidas.

- Equipamento

O aparelho utilizado neste tipo de ensaios é composto por duas partes: a primeira a que se dá o nome de “impactor”, constituída por uma haste metálica cuja extremidade vai ficar em contacto com a superfície a analisar e contém uma ou mais esferas, consoante as particularidades dos elementos em avaliação; e, na outra parte, um transdutor recetor que capta todos os deslocamentos provocados pelas ondas durante o ensaio (Fig. 4.13). É ainda necessário o uso de um computador portátil para armazenar toda a informação recebida pelo transdutor, ou seja, todos os deslocamentos provocados pelas ondas, e traduzi-las em espectros de amplitude assim como, em parâmetros dependendo do estudo que o técnico está a realizar [45].



Figura 4.13 – Equipamento utilizado no ensaio Impacto Eco [51].

- Procedimento

Depois de todo o material necessário reunido, passa-se então à realização do ensaio propriamente dito (Fig. 4.14) [45].

1. **Preparação da superfície de ensaio.** Com já vem sendo recorrente na descrição dos ensaios em elementos de betão, aqui é igualmente necessário acautelar a regularidade da superfície a ensaiar. Caso existam revestimentos, estes devem ser previamente removidos para não influenciar os resultados da avaliação.
2. **Zona de ensaio.** Depois de regularizada a superfície, o técnico procede ao desenho de uma malha sobre a mesma, a fim de determinar os pontos onde se realizará o ensaio. A distância entre eles vai depender da secção do elemento em estudo, pelo que, a malha terá de ter no mínimo 9 pontos.
3. **Realização do Ensaio.** Conhecidos os pontos de ensaio, é necessário escolher a esfera de impacto mais adequada consoante o resultado que se pretende obter, por exemplo, no caso de se quererem avaliar as descontinuidades o impactor deverá ter 8 mm de diâmetro. O inspetor deve ter especial atenção no caso de os pontos coincidirem com locais de descontinuidades. Neste caso, deve marcar mais, tendo sempre em conta a distância necessária entre eles. Estes pontos e distâncias devem constar nos desenhos posteriormente elaborados acerca dos ensaios, a fim de ajudar a interpretar melhor os resultados obtidos no ensaio [45; 52].
4. **Registo de dados.** Sobre cada ponto marcado é então realizado o ensaio impacto eco. O aparelho de ensaio vai fornecer o impacto à superfície em estudo, que se propaga no elemento, em forma de ondas. As ondas R são imediatamente captadas pelo transdutor recetor, enquanto as ondas P vai ser refletidas no interior do elemento estrutural. O computador vai recebendo toda esta informação.



Figura 4.14 – Ensaio de impacto eco realizado num muro de suporte e no interior de uma ponte, à esquerda e direita, respetivamente [53].

- Aplicabilidade

Este tipo de ensaios é utilizado, na sua forma mais simples, para determinar as espessuras dos elementos de betão, ou outro tipo de materiais, sendo que esta técnica consegue obter valores de até 2 m. Ainda assim, este não é o principal foco quando se realizam este tipo de ensaios. Usualmente os ensaios impacto-eco são utilizados para deteção de defeitos tais como: descontinuidades em elementos de betão, como por exemplo, enchimento deficitário em algumas zonas, ninhos de pedra, entre outros; e zonas delaminadas em pavimentos [45].

Em casos mais específicos, é possível determinar a que profundidade se encontram as fendas. Para isso, em vez do uso de apenas um transdutor no ensaio, são necessários dois (Fig. 4.15). Esta leitura só é possível caso as fendas sejam perpendiculares à superfície em que se realiza o ensaio. Para concluir, de referir que esta técnica pode ser usada para controlo da qualidade dos betões usados na construção [45].

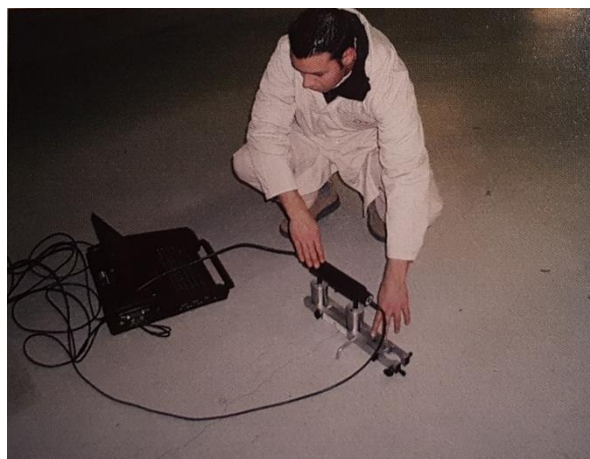


Figura 4.15 – Ensaio para medição da profundidade das fendas [45].

#### 4.2.1.3 Ensaio para determinar a permeabilidade do betão

A água e o ar são dois dos agentes de deterioração do betão que contribuem para a sua degradação. Daí tornar-se importante saber, consoante a espessura do elemento, a facilidade com que estes agentes conseguem penetrar no betão, por forma a determinar a compacidade e durabilidade da estrutura de betão. Apesar deste ensaio poder ser realizado segundo vários métodos, o que aqui será descrito é o método de Figg – Permeabilidade ao ar e à água [45].

Apesar de se utilizar o mesmo equipamento para a permeabilidade do ar e água os ensaios são distintos. Começando pelo ensaio de permeabilidade aparente ao ar, que se resume à contagem do tempo que o ar, imposto pelo aparelho, vai demorar a entrar num pequeno buraco realizado anteriormente no elemento em análise. Já no ensaio de permeabilidade aparente da água, será introduzida água nessa mesma cavidade até encher totalmente. Aqui o tempo medido será o necessário para o betão absorver 0,1 mL dessa água. Os tempos registados serão, respetivamente, o valor da permeabilidade ao ar e à água [45].

- Equipamento

O equipamento utilizado nestes dois ensaios pode ser observado na Figura 4.16 e é constituído por [45]:

- Unidade central com comandos;
- Dispositivo de leitura;
- Tubos flexíveis para ar e água e respetivas ligações ao dispositivo de leitura;
- Agulha hipodérmica;
- Bomba de pressão com válvula de vácuo;
- Seringa;
- Filtro de ar;
- Tampões de borracha.



Figura 4.16 – Equipamento utilizado no ensaio de permeabilidade aparente do ar e água [54].

- Procedimento

Este ensaio agrega duas fases distintas: a realização da análise de permeabilidade aparente do ar no betão, e de seguida, a permeabilidade aparente da água no betão [45].

1. **Preparação da superfície a ensaiar.** Em primeiro lugar, e com o auxílio de um berbequim, são abertas as cavidades fundamentais para o ensaio na peça de betão. Estas têm dimensões de 40 mm de profundidade e 10 mm de diâmetro. Seguidamente, deve proceder-se à limpeza desses mesmos furos, pois os detritos deixados pela sua realização podem comprometer o ensaio. Os tampões de borracha são colocados posteriormente nos buracos, posicionados perpendicularmente à superfície de maneira que o seu rebordo encaixe na perfeição. De frisar que, estes tampões contêm uma pequena abertura central que permite o encaixe da agulha hipodérmica, necessária no decorrer do ensaio.

2. **Ensaio de permeabilidade aparente ao ar no betão.** O técnico começa por ligar um tubo de saída de ar à agulha hipodérmica numa das extremidades, e ao aparelho utilizado na leitura dos valores, do outro lado (Fig. 4.17). A bomba é colocada em funcionamento, diminuindo a pressão até -55 kPa. O tempo que a pressão vai demorar a subir até - 50 kPa será então o valor correspondente à permeabilidade aparente do betão ao ar.
3. **Ensaio de permeabilidade aparente à água no betão.** Nesta segunda fase do ensaio, é ligado novamente um tubo à agulha hipodérmica mas desta vez tem de chegar ao fundo da cavidade. Esse tubo tem ligação também ao aparelho medidor (Fig. 4.18). Posteriormente a seringa vai introduzir a água na cavidade através do tubo de plástico. O aparelho medidor irá contabilizar o tempo que o betão demora a absorver 0,1 mL de água. Esse tempo será o valor da permeabilidade do betão à água.

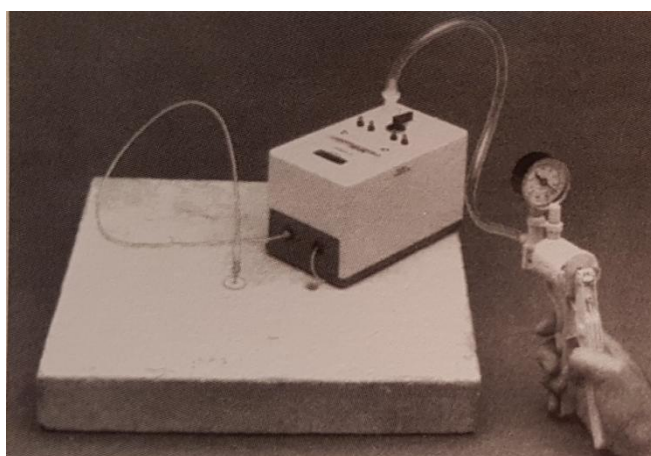


Figura 4.17 – Ensaio de permeabilidade aparente do betão ao ar [45]

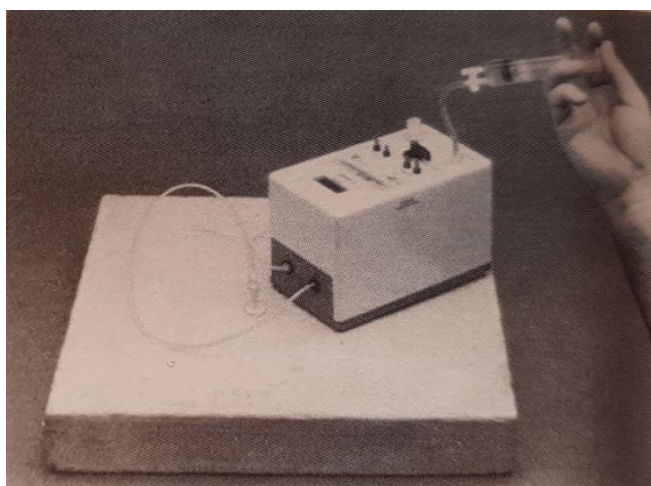


Figura 4.18 - Ensaio de permeabilidade aparente do betão à água [45]



#### 4.2.1.4 Ensaio da determinação do teor de cloretos no betão

O betão é um material poroso, o que potencia a entrada de agentes de deterioração. A juntar a esse facto, a existência de humidade nos elementos, torna a probabilidade da entrada de cloretos no betão enorme, isto é, caso os seus poros não contenham água não se verificará a penetração destes sais. A sua entrada pode ser feita por sucção capilar, sucção e permeação. [55]. Verifica-se uma maior incidência de cloretos nas edificações junto a zonas marítimas (Fig. 4.18).

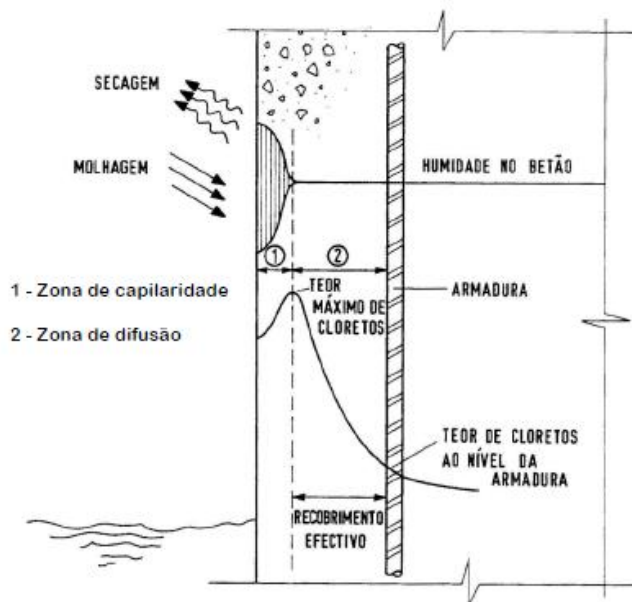


Figura 4.19 – Penetração de cloretos no betão em estruturas em contacto direto com a água. [56].

O ensaio para a determinação do teor de cloretos no betão dará informações acerca do estado de conservação do betão usado nas estruturas e da sua necessidade, ou não, de serem reabilitados. Com esta técnica, o investigador consegue saber de forma precisa qual o teor solúvel em ácido de cloretos na peça em análise [56].

O ensaio de teor químico é bastante simples: basta dissolver uma amostra de pó de betão dos elementos em análise, numa solução ácida, de acordo com a norma. Desta feita, caso existam, os cloretos vão reagir com o ácido. É de seguida colocado um eléctrodo com o objetivo de medir a temperatura a que ocorreu a reação. Um outro aparelho vai transformar a tensão gerada pelos iões cloreto em percentagem, corrigindo também a temperatura. É então possível ler-se a percentagem de iões cloreto presentes na solução [45].

Antes do técnico começar na recolha da amostra, é necessário que escolha o método de extração da mesma. Existem três formas possíveis [56]:

- **O Método de Perfuração a Seco:** esta opção traduz-se na elaboração de um pequeno furo no elemento de betão em análise, com o auxílio de um berbequim, e consequente recolha da amostra;

- O **Método de Corte e Moagem**: regularmente realizado em laboratório, neste método há a necessidade da recolha de provetes, *in situ*, para posteriormente serem esmagados e transformados em pó;
- O **Método de Desgaste a Seco**: como o nome indica, esta técnica não é mais que o desgaste do elemento, sempre paralelamente à superfície e recolha da amostra para análise.

Dos três métodos anteriormente descritos, de dizer que o método de perfuração a seco, acaba por ser a técnica de elaboração menos complexa e menos destrutiva, e com custos relativamente reduzidos comparativamente com os outros.

Posto isto, segue-se a descrição do equipamento a utilizar em cada fase:

- Equipamento (Fig. 4.20):
  - Para a recolha da amostra de betão [56]:
    - Método de perfuração a seco: berbequim, brocas, equipamento para recolha da amostra de pó, paquímetro, compressor de ar;
    - Método de corte e moagem: equipamento para cortar e retirar carotes de betão, aparelho de moagem dos provetes, paquímetro;
    - Método de desgaste a seco: berbequim, brocas, equipamento para recolha da amostra de pó, paquímetro, compressor de ar.
  - Para a realização da solução [45]:
    - Ácido para a solução;
    - Ácido para calibração do eléctrodo;
    - Eléctrodo munido de sensor de temperatura;
    - Aparelho de leitura e conversão de resultados;
    - Cabos e ligações;
    - Balança



Figura 4.20 – Equipamento utilizado para a determinação do teor de cloretos no betão [45].



- Procedimento

Para a elaboração deste ensaio, o técnico recorre a três fases distintas. A de recolha da amostra de betão a analisar, a calibração da solução química, e a análise da mesma e recolha de dados. Posto isto, passa-se à descrição detalhada de cada uma dessas fases.

1. **Recolha da amostra de betão.** Primeiramente, o técnico escolhe o local do ensaio. Recorre a um ensaio de deteção de armaduras para saber a disposição destas no elemento a ensaiar. Depois de decido o local de ensaio é usado o equipamento de recolha da amostra de pó do betão. Elabora 3 furos, isto claro, pelo método de perfuração a seco, com o auxílio de um berbequim, e com a profundidade suficiente a que se pretende determinar o teor de cloretos presentes no betão. Imediatamente a seguir é feita a recolha do pó, cerca de 20g por cada perfuração, e guardada devidamente. Segundo Córias [2], caso se deseje obter um perfil de cloretos, são necessárias perfurações de diferentes níveis:
  - a. Imediatamente abaixo da superfície;
  - b. Ao nível a que se encontram as armaduras;
  - c. Um pouco abaixo das armaduras.
2. **Calibração da solução química.** Para cada amostra vai haver uma solução de química para se realizar o ensaio. De prever que estas terão que ser exatamente iguais, para não diferir, claro, nos resultados obtidos. Para isso, a calibração das soluções é realizada imediatamente antes de cada ensaio, com soluções padrão [45].
3. **Ensaio para determinação do teor de cloretos.** Da amostra recolhida de 20g, o técnico retira 3g que vai juntar à solução ácida, de cerca de 20mL, previamente preparada. Dá-se a reação química, e coloca-se o elétrodo para medição dos resultados [45].

#### 4.2.1.5 *Ensaio para a deteção de armaduras, análise do seu diâmetro e medição do recobrimento*

O ensaio para deteção das armaduras e conhecimento das suas características torna-se bastante importante na análise de estruturas de betão armado. Serve de antecessor a muitos outros ensaios e é fundamental quando é necessário intervir na estrutura. Assim, com as informações recolhidas sobre a localização das armaduras, o seu diâmetro e até mesmo do seu valor de recobrimento, é possível intervir nos elementos de betão armado sem interferir com o bom funcionamento das armaduras e colocar em causa toda a segurança da construção [57].

- Equipamento utilizado no ensaio

O equipamento utilizado no ensaio designa-se por pacómetro é simples e de fácil utilização (Fig. 4.21 e 4.22). O equipamento é composto por um aparelho central que permite ao técnico a leitura dos dados e ainda regista os mesmos para posterior análise; e ainda contém diferentes sondas, que serão usadas consoante o caso a analisar [57].



Figura 4.21 – Pacómetro [58].

Existem quatro tipos de sondas diferentes, cada uma ser usada em situações diferentes, são elas [57]:

- A Sonda Standard: permite a identificação das armaduras e consegue medir o recobrimento médio. Este tipo de sonda é a mais utilizada.
- A Sonda de Profundidade: tem as mesmas funções de identificação e medição, mas para zonas onde será difícil a obtenção de resultados pelas sondas standard.
- A Sonda de Armaduras Densas: utilizada em elementos cuja malha das armaduras é extremamente densa, permitindo esta sonda fornecer valores exatos acerca das armaduras.
- A Sonda de Longo Alcance: usada em elementos com recobrimentos elevados. Nestes casos torna-se necessária uma sonda de longo alcance, a fim de medir corretamente as armaduras.



Figura 4.22 – Equipamento de deteção e medição das armaduras.

Esses aparelhos deverão ter algumas particularidades, tais como: o pacómetro tem de ter um alcance de 360mm ou 220mm para armaduras de diâmetro de 40 mm e 6 mm, respetivamente; os aparelhos deverão calibra-se automaticamente; têm de permitir medições até à face dos

varões, isto é, devem ignorar as suas nervuras; e por fim, a exatidão referente ao recobrimento não deverá exceder o maior de dois valores:  $\pm 2$  mm ou 5% do alcance total [52].

- Procedimento

1. **Antes da realização do ensaio.** Escolher os elementos de betão armado a ensaiar será o primeiro passo. Seguidamente, o técnico deve acautelar-se de que a superfície em que vai colocar o aparelho está regular. Como existem sempre irregularidades deixadas pelas cofragens, depois da medição do recobrimento o técnico terá de realizar uma média dos valores medidos [52]. Antes mesmo do ensaio começar, e de ser colocado a funcionar o pacómetro, este terá de ser calibrado, e para isso apenas se prime o botão “zero”, estando este afastado de qualquer tipo de elementos metálicos [57].
2. **Determinação do diâmetro das armaduras.** Para o efeito, o equipamento vai realizar duas leituras a cada varão, sendo que uma é perpendicular e a outra será paralela ao mesmo. Assim, consegue-se obter o valor do diâmetro da armadura em análise (Fig. 4.23). Contudo, é sempre importante confirmar com os dados de projeto [45].



Figura 4.23 – Utilização do pacómetro no ensaio [59].

3. **Deteção das armaduras no elemento de betão.** Prossegue-se no ensaio para a deteção da presença de armadura em todo o elemento de betão em análise. O técnico escolhe a sonda que mais se adequa a cada situação e faz uma espécie de varrimento com esta sobre toda a peça avaliando assim a presença de elementos metálico, ou seja, as armaduras. Aquando da deteção das mesmas, o aparelho emite um som que será mais ou menos intenso consoante está mais ou menos próximo das armaduras. Quando o som se torna mais intenso devido à presença de armadura muito próxima do detetor, o técnico deve marcar o seu local com lápis ou giz (Fig. 4.24). Este processo é realizado até se conseguir definir a posição completa da armadura na peça de betão [52].



Figura 2.24 – Detecção e marcação das armaduras na peça de betão armado [58].

4. **Medição do recobrimento.** À medida que se faz a análise a todo o elemento de betão e vai sendo determinada a presença das armadura quando emite o som mais alto, é também registado o valor do recobrimento nesses pontos de medição.

Todos estes resultados são mostrados e registados no aparelho central. Este permite ainda, ser ligado a um computador para passar toda a informação.

#### 4.2.1.6 Ensaio para a determinação da carbonatação no betão

A carbonatação do betão é uma questão sempre muito presente. O contacto das estruturas de betão com o dióxido de carbono existente na atmosfera é uma realidade. Este fenómeno da carbonatação acontece quando o dióxido de carbono presente no ar reage com o hidróxido de cálcio, dos elementos de betão, originado pelas reações de hidratação do cimento. A carbonatação é tanto maior, quanto maior for a presença de dióxido de carbono, assim como, quanto maior for a porosidade do betão [60].

Este ensaio tem o objetivo de determinar até que profundidade estão carbonatados os elementos de betão para se prever qual a possibilidade da corrosão das armaduras. Assim, depois de avaliados os resultados deste ensaio, podem ser elaborados estudos que permitam avaliar a durabilidade das estruturas de betão armado [52]. Neste tipo de ensaio são elaborados furos nas peças em análise, *in situ*, e logo de seguida coloca-se uma solução de fenolftaleína que permite determinar até onde estão carbonatados os elementos (Fig. 4.25) [45].



Figura 4.25 – Colocação da solução de fenolftaleína na perfuração [61].

- Equipamento

Segundo a especificação E391 do LNEC, o equipamento necessário a este ensaio de carácter semi destrutivo é:

- Um berbequim;
- Solução de fenolftaleína a 0,1%;
- Ferramentas auxiliares, como: martelo, escopro, borrifador, régua.

- Procedimento

De seguida passa-se à explicação de todo o processo de forma pormenorizada:

1. **Escolha do elemento a ensaiar.** O técnico tem de ter especial cuidado com a escolha do elemento a ensaiar. Como se trata de um ensaio de carácter semi destrutivo, este pode trazer consequências à estrutura, relativamente à estabilidade, à durabilidade, e até mesmo acerca da segurança do mesmo. Deve-se ter sempre presente qual é o objetivo, isto é, como se sabe o betão é mais carbonatado quanto maior for a sua exposição e o seu contacto com dióxido de carbono, daí que esse seja um dos critérios de escolha do elemento a ensaiar.
2. **Realização dos furos para o ensaio.** Depois de escolhidos os elementos, é necessário escolher os locais de perfuração, sendo que, por exemplo, estes não podem coincidir com zonas cuja presença de armaduras é uma realidade. Este ensaio tem de ser complementado com o ensaio que permite a deteção das armaduras. Posto isto, procede-se à perfuração, com o auxílio de um berbequim, nos pontos anteriormente escolhidos. Segundo a especificação E391 do LNEC, estes furos têm de exceder em pelo menos 1 cm, o valor do recobrimento.
3. **Colocação da solução de fenolftaleína nas cavidades.** Após a perfuração, é retirada a carote de cada uma das cavidades, e é realizada uma limpeza ao furo, pois os resíduos deixados podem comprometer os resultados obtidos. Posto isto, é então a

altura de, com a ajuda de um borrifador, colocar a solução de fenolftaleína a 0,1%, na perfuração, e observar-se o resultado [45].

4. **Medição da profundidade de carbonatação do betão.** Passados alguns minutos da colocação da solução fenolftaleína, observa-se a coloração dos espaços não carbonatados, a cor-de-rosa, enquanto a zona do elemento que está carbonatada vai permanecer incolor [57]. Prossegue-se com a medição da profundidade da zona carbonatada, como se pode observar na Figura 4.26.



Figura 4.26 – Medição da profundidade de carbonatação no betão armado [62].

#### 4.2.1.7 Ensaio de aderência por tração – Pull Off

O ensaio de aderência por tração, mais comumente chamado de ensaio de Pull-Off, teve início no ano de 1970 em Inglaterra e tem a finalidade de medir a resistência do betão *in situ* [63]. Não é apenas com objetivo da medição da resistência do betão que são utilizados estes ensaios. Sabe-se que, a aderência é uma característica muito importante também no que diz respeito à ligação entre o betão e outros materiais, nomeadamente os que servem de revestimento do mesmo. Por definição, tem-se que a aderência corresponde à maior força de rotura por cada unidade de superfície em análise e pode ser medida de duas maneiras: por meio da aplicação de uma força de corte ou de uma força de tração [64]. De salientar que o equipamento seria o mesmo para a elaboração dos dois ensaios.

Pela sua simplicidade, este ensaio pode ser realizado diretamente sobre as estruturas de betão, *in situ*, nomeadamente sobre lajes, vigas, ou outros elementos de betão com reduzida dimensão. Em cada elemento a ensaiar é aplicada uma força de tração suficiente para arrancar um disco de metal que vai estar ligado à superfície da peça de betão através de cola apropriada. Essa força de tração está diretamente relacionada com a resistência à compressão do betão (Fig. 4.27) [65].



Figura 4.27 – Ensaio de aderência por tração ou ensaio Pull –Off [66].

- Equipamento

O equipamento essencial à realização deste ensaio é o seguinte (Fig. 4.28) [45, 52]:

- Carotadora portátil;
- Coroas diamantadas;
- Aparelho de aderência;
- Cola epoxídica;
- Aspirador para recolher detritos



Figura 4.28 – Equipamento para o ensaio Pull – Off [67].

- Procedimento

O ensaio de aderência por tração realiza-se da seguinte forma:

1. **Preparação da zona a ensaiar.** Primeiramente, procede-se a escolha do elemento a ensaiar. De seguida, o técnico deve ter atenção para que na zona do elemento a realizar não haja interferência das armaduras. Para isso, aconselha-se a utilização de



um pacómetro e a realização do teste de detecção de armaduras. Depois faz-se a marcação dos pontos nos locais a ensaiar. Normalmente esses pontos são situados no espaço que existe entre as armaduras. No mínimo são ensaiados três pontos, cujo afastamento depende apenas da interferência que possam ter uns nos outros [52].

2. **Colocação das pastilhas metálicas.** Antes da colocação das pastilhas metálicas é preciso fazer uma pequena cavidade, ao que se dá o nome de pré-caroteamento, com as dimensões da mesma, nomeadamente, com o diâmetro de 50 mm e uma profundidade de 20 mm. Posto isto, e depois de devidamente limpa a cavidade, é a altura de colar as pastilhas, com uma cola própria, uma resina epoxídica [46].
3. **Execução do ensaio de aderência.** Após a colagem das pastilhas, o técnico tem de esperar o tempo suficiente para que a cola utilizada faça o efeito pretendido. Alguns autores defendem que o ensaio pode ser realizado 1 hora após a colagem. Ajusta-se o aparelho que fornece a força de tração às pastilhas, enroscando-o na mesma. A força exercida deve ocorrer entre a pastilha, a resina e o elemento de betão, e deve atuar uniformemente e na perpendicular relativamente aos elementos, como se verifica na Figura 4.29 [46]. O aparelho fornece então a força de tração exercida.

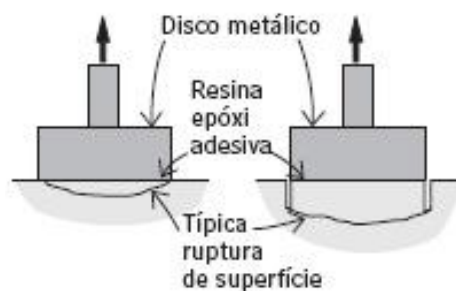


Figura 4.29 – Mecânica de aplicação das forças no ensaio Pull-Off [39].

4. **Resultados Obtidos.** O betão vai entrar em rotura quando a força de tração atinge um determinado valor. O valor pretendido neste ensaio não será mais que a força necessária à rotura dividida pela área da pastilha utilizada. Caso, depois do ensaio se verifique que agarrada à pastilha existam pedaços de betão pouco significativos, isso poderá significar que o tempo de cura da resina utilizada não foi o suficiente e que o betão é bastante mais resistente que essa ligação. Caso ocorra uma rotura por corte do betão, então agarrada à pastilha vai se observar uma porção significativa de betão com o formato da mesma, mas com uma espessura que será variável [46].

#### 4.2.1.8 Ensaio de medição de humidade superficial

A água é a inimiga número um das construções e quando se fala na ciência das patologias neste conceito, associa-se sempre a água a um fator de degradação. Há a necessidade acautelar a existência de humidade, na fase de projeto, pela previsão da sua existência bem



como dos danos que pode causar nas estruturas. E na fase de execução das construções deve haver um controlo da mesma [68]. A humidade pode estar presente devido a diversos fatores, tais como: a existência desde o tempo de execução da construção, ou seja, a água que ficou retida desde aí; a capilaridade do betão, água que se infiltra através desse processo, nomeadamente em elementos que se encontram em contacto com o solo; por erros de construção, ou patologias existentes nas estruturas que permitam a infiltração de água; e pela penetração de água devido a causas acidentais como o rebentamentos de canalizações, por exemplo [4].

O ensaio de medição da humidade superficial nos edifícios permite determinar a percentagem de humidade que o elemento contém. O seu princípio consiste na medição da resistência elétrica de cada elemento a analisar. Sabe-se que o valor da resistência medida vai depender da quantidade de água existente nos poros do elemento em avaliação [69].

- Equipamento

O equipamento usado neste tipo de ensaios é o humidímetro e é de fácil utilização. Este aparelho mede a humidade superficial dos elementos através de dois elétrodos, com a forma de agulhas [69], como exemplificado na Figura 4.30.



Figura 4.30 – Humidímetro para medição de humidade em paredes de betão [70].

- Procedimentos

O procedimento deste ensaio é muito simples. As medições são elaboradas eletronicamente, através do humidímetro. Basta colocar os dois elétrodos em contacto com a superfície a analisar, nos diversos pontos previamente estipulados para se fazerem as medições. O aparelho dará de seguida o valor da humidade superficial, em percentagem, em cada um dos pontos [2].

### 4.3 Ensaios Laboratoriais

#### 4.3.1 Ensaio de arranque Pull-Out

Os primeiros ensaios de Pull-Out, também designado por ensaio de arranque, remontam ao início do século XX, cerca do ano 1930, e foram realizados nos Estados Unidos da América. A partir desse momento, a técnica tem vindo a ser aperfeiçoada até ao que se conhece hoje em dia. O objectivo deste ensaio é medir a força necessária ao arranque de uma determinada peça embebida num elemento de betão. Contudo, este método só começou a ganhar reconhecimento quando foi desenvolvido o sistema Lok – Test, em 1960, em que na superfície de betão a ensaiar é colocado um anel de compressão, que mais tarde é arrancado. O objetivo é medir a resistência à compressão da superfície do betão [71].

Neste ensaio é colocado previamente um disco metálico na peça de betão a ensaiar. Depois de endurecido o betão, procede-se ao ensaio para determinar qual a força máxima que é precisa para fazer arrancar esse mesmo disco metálico. Um sistema de carga é forçado a reagir contra o betão, exercendo então a força de arranque [72].

- Equipamento

No ensaio Pull- Out o equipamento utilizado é (Fig. 4.31):

- Sistema hidráulico para a aplicação da carga;
- Equipamento digital para realizar as leituras;
- Anel de compressão;
- Dispositivo de fixação para colocar no betão.



Figura 4.31 – Equipamento utilizado no ensaio Pull- Out [73].

- Procedimento

Neste ensaio de arranque, realizado em laboratório, é essencial a produção prévia de provetes. Antes do enchimento dos moldes com o betão, o técnico tem de ter em conta a necessidade de incorporar o dispositivo de fixação na cofragem, para posteriormente permitir a realização do ensaio Pull- Out (Fig. 4.32).

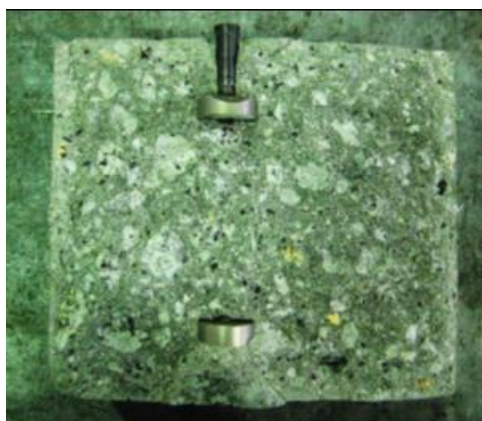


Figura 4.32 – Dispositivos de fixação ao betão, depois da realização do ensaio [72].

Depois coloca-se o betão nos moldes e deixa-se endurecer os dias necessários, de acordo com as normas. Alguns dias mais tarde realiza-se então o ensaio de arranque, baseado na teoria Lok-Test, que se traduz pelas seguintes etapas [72]:

1. **Preparação da superfície.** O técnico deve ter em atenção que a superfície onde se realiza o ensaio pode conter irregularidades que têm de ser eliminadas. O avaliador pode comprovar o estado da superfície pelo assentamento do anel de compressão em cima da mesma, se este não oscilar, então confirma-se a regularidade da superfície.
2. **Preparação do equipamento.** Os provetes de ensaio já estão previamente elaborados, contendo os discos de fixação. Estes foram fixados na cofragem, e colocados perpendicularmente à superfície de ensaio. Depois de descofrados os provetes, há a necessidade que aos discos de fixação seja retirado um veio, deixando assim à vista um furo tronco – cónico, concêntrico ao disco. Procede-se então com as ligações, que vão ocorrer entre o disco de fixação e o equipamento que vai aplicar a carga. Este último contém um anel de compressão que é colocado contra a superfície de betão a ensaiar, na direção do veio do disco de fixação (Fig. 4.33).
3. **Ensaio de arranque.** O ensaio consiste na aplicação lenta de uma carga, através de um sistema hidráulico. Esta carga deverá ser aplicada segundo a perpendicular da superfície do elemento de betão e a uma velocidade constante de cerca de 0,3 kN/s. Os valores vão sendo indicados no aparelho de medida e quando se verifica uma ligeira descida significa que a rotura do betão já ocorreu. Regista-se o maior valor indicado, que corresponde ao valor necessário para provocar a rotura no elemento de betão. Segundo a norma NP EN 12504-3, o valor da força aplicada é registado com um arredondamento de 0,05kN (Fig. 4.34).



Figura 4.33- Ensaio de arranque – Pull Out com sistema hidráulico manual [72].

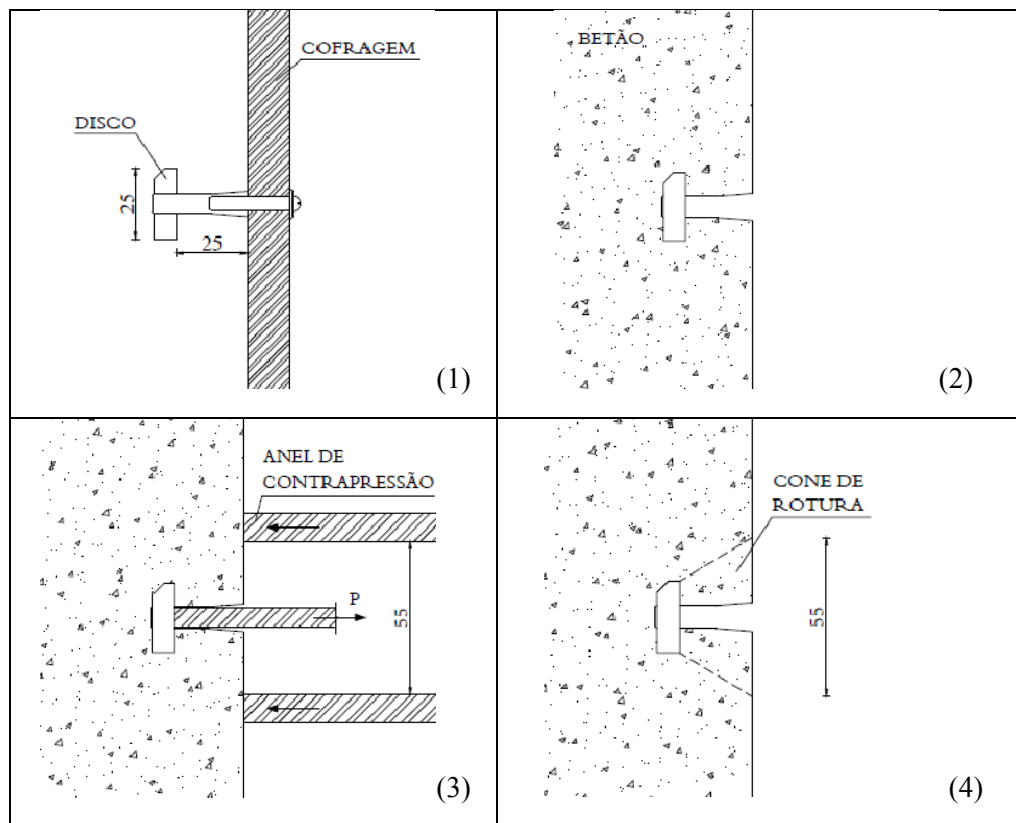


Figura 4.34 – Fases do ensaio de Pull-Out: 1) Colocação dos discos de fixação nos provetes de betão; 2) Aspeto do provete depois de retirada a cofragem; 3) Aplicação da carga no provete de betão; 4) Ruptura do provete de betão [74].

### 4.3.2 Ensaio de Resistência Mecânica à Tração por Flexão

Os ensaios de resistência mecânica à tração podem ser realizados aos 7, aos 28 dias ou outro intervalo de tempo depois da amassadura, e têm o objetivo de determinar a resistência dos provetes de argamassa ou de betão, à tração por flexão. Os provetes são submetidos a uma carga aplicada, transmitida pelos roletes assentes na superfície, da parte superior e inferior. Imediatamente antes de os provetes atingirem a rotura deve registar-se a carga máxima que suportam.

- Equipamento

Não é necessário muito equipamento para a realização deste ensaio (Fig 4.35):

- Sistema hidráulico para exercer a força;
- Computador com programa para fazer o registo dos ensaios;
- Peças metálicas específicas para aplicar as forças nos provetes de argamassa ou de betão.



Figura 4.35 – Equipamento de ensaio de tração por flexão, em argamassas à esquerda, em betões, à direita [75].

- Procedimento

Estes ensaios são realizados vários dias após a amassadura, pelo que os provetes devem ser realizados com essa antecedência e de acordo com todas as normas.

1. **Preparação do equipamento.** Antes do ensaio começar, tem de se proceder à limpeza de todo o equipamento para que os possíveis resíduos existentes no equipamento não interferiram nos resultados. Também se deve regularizar as superfícies do provete em contacto com o equipamento, pelo mesmo motivo. Depois coloca-se o provete na máquina na posição correta.

2. **Ensaio de tração por flexão.** Segundo a norma NP EN 12390 – 5, antes da aplicação da carga nos provetes é imprescindível garantir que os todos os roletes estão assentes sobre a superfície do provete (Figura 4.36). O técnico seleciona de seguida a velocidade que pretende para a aplicação da carga e inicia a sua aplicação, de uma forma constante, até ocorrer a rotura.

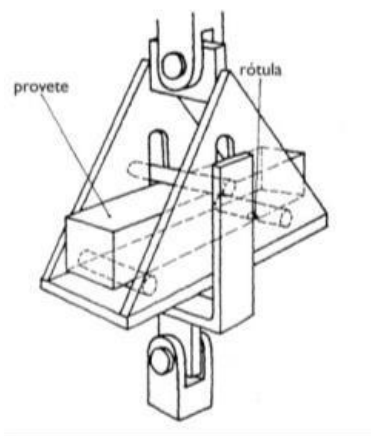


Figura 4. 36 – Esquema do ensaio de tração por flexão em argamassas [75].

#### 4.3.3 Ensaio de Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão em provetes é vulgarmente utilizado para determinação da resistência à compressão dos betões ou argamassas. No caso das argamassas, reutilizam-se os provetes, ou o que resta deles, do ensaio descrito anteriormente, de resistência à tração por flexão. No caso dos betões são produzidos provetes específicos para este tipo de ensaio, cúbicos ou cilíndricos, ou são usados carotes recolhidos na estrutura de betão em análise. Com este ensaio pretende-se registar a carga máxima que o provete suportará.

- Equipamento

Neste ensaio o material a utilizar é o seguinte (Fig. 4.37):

- Máquina de ensaios de compressão;
- Computador para registar resultados.



Figura 4.37 – Ensaio de compressão em provetes de argamassa, à esquerda, e em provetes de betão, à direita [75].

- Procedimento

Para a execução deste ensaio é necessária a realização prévia dos provetes. Como estes ensaios são realizados vários dias após a amassadura, os provetes deverão ser produzidos previamente. Segundo a norma NP EN 12390 – 3, estes provetes devem ter formas específicas, ou seja, devem ser em forma de cubo, cilindro ou carote, e ter as dimensões exatas que as norma refere. Como já referido, no caso das argamassas os provetes utilizados neste ensaio são os provenientes do ensaio de tração.

O ensaio segue os seguintes passos:

1. **Preparação do equipamento.** Antes de se proceder ao ensaio propriamente dito, é imprescindível a limpeza de todo o equipamento para não interferir nos resultados. Também se deve proceder à regularização das superfícies do provete em contacto com o equipamento, pelo mesmo motivo. Segue-se a colocação do provete na máquina de ensaio, a posição do provete deve estar centrada com o sistema de aplicação da força.
2. **Aplicação da carga.** A norma NP EN 12390-3 sugere a aplicação de uma carga inicial, cujo valor não deve ultrapassar os 30% da carga necessária à rotura, e a partir daí a carga deve ser aplicada a uma velocidade constante. O computador ligado ao equipamento de ensaio vai registar a carga máxima, imediatamente antes da rotura do provete (Fig. 4.38).

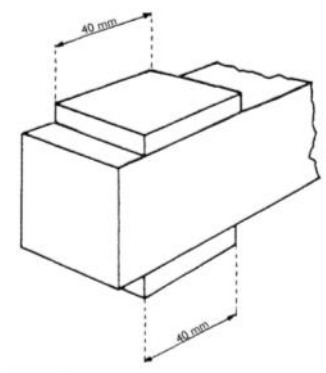


Figura 4.38 – Esquema do ensaio de compressão num provete de argamassa.

#### 4.3.4 Ensaio de capilaridade

O betão é um material poroso, o que potencia a entrada de água através dos seus vazios. Esta pode entrar de diversas formas, mas a que se analisará neste ensaio, é a absorção por capilaridade. A capilaridade ocorre devido à diferença de pressão entre a superfície da água livre, em contacto com a superfície exterior do betão, e a existente nos poros do elemento de betão.

- Equipamento

Relativamente ao equipamento utilizado neste ensaio, pode dizer-se que é bastante simples. É apenas necessário um recipiente onde se colocarão os provetes a ensaiar, e uma régua, para a medição da altura de absorção de água.

- Procedimento

Este ensaio está descrito, em pormenor, na especificação do LNEC, E 393.

1. **Preparação dos provetes.** Em primeiro, há que secar os provetes a ensaiar, numa estufa, e efetuar a sua pesagem a cada 24h. Quando a variação da sua massa for inferior a 0,001g, os provetes estão prontos para o ensaio. Os provetes devem ser arrefecidos num local seco.
2. **Preparação do ensaio.** O técnico deve encher o recipiente com água, cerca de 5 mm acima da face inferior do provete. Este deve ter a sua superfície inferior em contacto com a água e não diretamente assente no recipiente (Fig. 4.39). O nível da água deve ser mantido constante ao longo de todo o ensaio.
3. **Medição da absorção de água.** Assim que o provete é colocado em contacto com a água, começam as medições. Os provetes devem ser retirados com muito cuidado e fazendo um angulo de 45° que permita o escoamento da água sem comprometer as



leituras. Posteriormente devem ser colocados numa superfície não absorvente. Consoante os provetes, de argamassa ou de betão, as medições devem ser realizadas a tempos pré definidos (Fig. 4.39). No caso das argamassas, a 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1h, 2h, 3h, 5h, 7h, 24h, 48h e 72h e no caso dos betões, a 1h, 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, após serem colocados em contacto com a água.



Figura 4.39 – Ensaio de absorção de água por capilaridade. Medição da absorção de água [75].

#### 4.3.5 Ensaio de carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada, realizado em laboratório, pretende medir a penetração de  $\text{CO}_2$  em provetes de betão, quando estes são expostos a um ambiente favorável a uma carbonatação acelerada. Para a descrição deste ensaio foram seguidos os procedimentos descritos na especificação E 391 do LNEC.

- Equipamento

Neste ensaio o equipamento necessário para a sua realização foi:

- Máquina de corte de provetes com discos adiamantados;
- Régua;
- Câmara com entrada e saída de gases;
- Fluxómetros para medição do  $\text{CO}_2$ ;
- Solução de fenolftaleína a 0,1%.

- Procedimento

Este ensaio é elaborado em provetes, que podem ser produzidos em laboratório, ou podem ser obtidos através de carotagem. Posto isto, prossegue-se o ensaio.

1. **Preparação dos provetes.** Segundo a especificação E 391 do LNEC, os provetes para ensaio produzidos em laboratório devem ser mantidos em água durante 14 dias. Os dias restantes, até atingir os 28 dias, devem ser colocados ao ar. Tanto os provetes obtidos por carotagem como os produzidos em laboratório devem levar um produto isolantes nos topos para impedir a entrada de  $\text{CO}_2$ .
2. **Preparação do ensaio.** Os provetes são introduzidos na câmara, com uma humidade relativa compreendida entre 55 e 65%, com uma temperatura de cerca de  $23^\circ\text{C}$  e ar introduzido com 5% de  $\text{CO}_2$ .
3. **Medição da profundidade de carbonatação.** A especificação E 391 do LNEC, usa-se uma solução de fenolftaleína a 0,1% para medir a profundidade de carbonatação dos provetes de argamassa ou de betão.



Figura 4.40 – Preparação dos provetes, câmara para o ensaio de carbonatação acelerada e medição da profundidade de carbonatação [75].

## 5. CASOS DE ESTUDO

### 5.1 Enquadramento

Este capítulo consiste na apresentação de casos reais de estudo. Serão apresentados alguns ensaios laboratoriais e respetivos resultados realizados no âmbito de um estudo de argamassas e betões com a incorporação de nano-partículas. Estas adições foram introduzidas juntamente com o ligante, aquando da amassadura das argamassas e dos betões, com três objetivos principais: aumentar a sua durabilidade e melhorar os seus desempenhos; permitir uma redução significativa do ligante, cimento; e por fim, proporcionar um aumento da aderência entre a pasta ligante e as armaduras. Neste documento apenas será apresentado uma breve descrição dos provetes usados nos ensaios, quer de argamassa quer de betão, e serão apresentadas as resistências obtidas nos ensaios de compressão, tração por flexão, e outras características como a capilaridade e carbonatação.

Na segunda parte deste capítulo serão apresentados casos reais de estruturas onde foram aplicados os ensaios enunciados e descritos no capítulo anterior.

### 5.2 Ensaios laboratoriais realizados no âmbito de um estudo de argamassas e betões com adição de nano-partículas

As nano-partículas, como o próprio nome indica, são partículas de reduzido tamanho, com elevada área específica e elevada reatividade, e vão servir para colmatar os espaços vazios da matriz das argamassas ou dos betões. Algumas das vantagens relacionadas com o uso deste tipo de adições prendem-se com o aumento da resistência do betão, assim como com o aumento da sua durabilidade, pois as nano-partículas vão atuar na pasta ligante e fortalecer a sua estrutura [75]. Neste estudo foram utilizadas nano-partículas de sílica ( $\text{nanoSiO}_2$ ), alumínio ( $\text{nanoAl}_2\text{O}_3$ ) e zinco ( $\text{nanoZnO}$ ).

- **Resistência mecânica à tração por flexão**
  - Argamassas

A Figura 5.1, representada abaixo, é ilustrativa do ensaio de resistência mecânica à tração por flexão nas argamassas. Estes ensaios foram realizados aos 7 e aos 28 dias depois da amassadura.



Figura 5.1 – Ensaio de tração por flexão em provetes de argamassa [75].

Foram ensaiados vários provetes, cada um com uma composição diferente: os provetes da mistura de referência, os que tinham incorporadas as nano-partículas de ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>, e ainda, provetes com nano-partículas e fibras de aço. Na Tabela 5.1, podem ser observados os resultados da resistência mecânica à tração, em MPa, dos provetes das misturas de referência, ensaiados aos 7 dias e aos 28 dias [75].

Tabela 5.1 – Valores do ensaio de resistência à tração das misturas de referência (adaptado de [75]).

Misturas		7 dias	28 dias
550	RA	10,95	9,47
	RB	8,77	8,83
	RC	8,73	9,63
	RD	9,26	9,06
750	RA	8,37	11,83
	RB	10,24	10,65
	RC	12,22	10,80
	RD	10,23	6,69
950	RA	11,48	16,84
	RB	9,98	8,28
	RC	10,43	9,99
	RD	7,01	6,77

As argamassas foram efetuadas com níveis de resistência diferentes. Para cada um desses níveis, realizaram ainda quatro misturas de referência, denominadas por RA, RB, RC e RD, com 100% de cimento, com 80% de cimento e 20% de cinzas volantes, com 80% de cimento e 20% de filler calcário e com 80% de cimento, 15% de filler calcário e 5% de sílica de fumo, respetivamente. Verifica-se que nas misturas R750 houve um acréscimo de resistência aos 7 dias nas misturas com adições, sendo mais evidente na mistura RC. Contrariamente a este resultado, estão os das misturas R550 e R950, cuja resistência à tração aos 7 dias foi mais

elevada nas misturas com 100% de cimento. Nos ensaios aos 28 dias, têm-se, maioritariamente, valores de resistência à tração inferiores nas misturas com adições [75].

○ Betões

Tal como nas argamassas, também os provetes de betão foram ensaiados à tração. Neste caso, o betão foi ensaiado aos 28 dias. Na Figura 5.2, pode-se observar o esquema de ensaio.

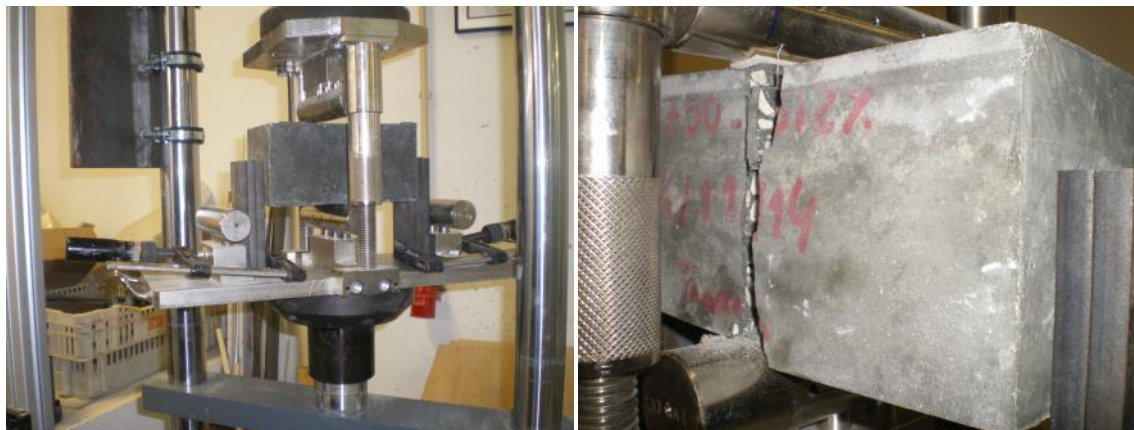


Figura 5.2 – Ensaio de resistência à tração em provetes de betão [75].

Também neste caso foram usadas diferentes misturas com e sem nano-partículas e com diferentes dosagens de cimento. Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração aos 28 dias estão representados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de resistência à tração em provetes de betão (adaptado de [75]).

Resistência à tração (MPa)	
CA 350	4,78
CA 350_Si2%	4,09
CA 350_Al2%	4,52
CA 550	5,74
CA 550_Si1%	6,69
CA 550_Si2%	7,21
CA 550_Al2%	6,89
CA 550_Zn1%	6,24
CA 750	6,48
CA 750_Si1%	6,87
CA 750_Si2%	7,35
CA 750_Al2%	8,18
CA 750_Zn1%	7,35

Verifica-se que, para as misturas CA350, o valor da resistência à tração é superior para a mistura de referência. Pelo contrário, nas misturas correspondentes à pasta ligante CA550 e

CA750, os valores de resistência à tração são mais elevados para as composições com adição de nano-partículas. Na mistura CA550, o valor mais elevado de resistência à tração verifica-se com a adição nanoSi2% e na mistura CA750 com a adição nanoAl2%.

- **Resistência mecânica à compressão**

- Argamassas

Também a resistência à compressão foi avaliada nas argamassas. Os provetes dos ensaios de tração foram reaproveitados e usados nos ensaios à compressão. Na Figura 5.3, são demonstrados os ensaios nos provetes de argamassas.



Figura 5.3 – Ensaio de compressão em provetes de argamassa [75].

Estes ensaios são realizados aos 7 e aos 28 dias, tal como os ensaios de tração. Na Tabela 5.3, serão expostos alguns dos resultados obtidos neste ensaio, aos 7 e aos 28 dias, como exemplo [75]. Estes resultados correspondem às misturas de referência com adições. Nos ensaios aos 7 dias, verifica-se uma maior resistência à tração nas misturas cujo ligante é 100% cimento (RA). Já no que respeita aos ensaios aos 28 dias, para a referência R550, a resistência à tração também é mais elevada quando não existem adições na mistura. Pelo contrário, na série R750 e R950, os valores do ensaio de resistência verificaram-se superiores para as misturas com adições de filer calcário e sílica de fumo, neste caso, RD750 e RD950.



Tabela 5.3 - Valores do ensaio de resistência à compressão das misturas de referência (adaptado de [75]).

Misturas		7 dias	28 dias
550	RA	53,71	61,72
	RB	46,50	55,19
	RC	43,90	51,77
	RD	39,81	52,85
750	RA	73,06	80,64
	RB	72,18	75,38
	RC	70,60	76,96
	RD	67,18	81,34
950	RA	85,87	92,37
	RB	78,35	90,10
	RC	64,77	92,33
	RD	<b>65,32</b>	95,19

○ Betões

Os vários provetes de betão foram também ensaiados à compressão (Fig. 5.4).



Figura 5.4 – Ensaio de compressão em provetes de betão [75].

Os ensaios foram elaborados aos 7 e aos 28 dias. Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados obtidos no âmbito deste ensaio. A resistência à compressão nos provetes de betão, quando ensaiados aos 7 dias, tem um valor superior na mistura de referência, sem adição de nano-partículas, nas CA350 e CA750. Para a pasta ligante referente à mistura CA550, o valor de resistência à compressão é mais elevado na mistura que tem a adição de nanoAl2%. Aos 28 dias, apresenta resultados superiores para o valor de resistência à compressão para a mistura de referência CA350, para a mistura CA550 com a adição de nanoZn1% e para a mistura CA750 com adição de nanoSi2%.

Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão em provetes de betão (adaptado de [75])

	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
CA 350	38,70	43,79
CA 350_Si2%	35,20	41,30
CA 350_Al2%	38,00	41,30
CA 550	59,70	72,10
CA 550_Si1%	62,50	66,50
CA 550_Si2%	64,10	68,60
CA 550_Al2%	65,60	76,00
CA 550_Zn1%	56,90	81,60
CA 750	84,28	78,20
CA 750_Si1%	84,04	91,39
CA 750_Si2%	80,22	97,32
CA 750_Al2%	83,20	92,52
CA 750_Zn1%	69,31	89,92

#### • Absorção de água por capilaridade

Outro ensaio realizado em laboratório no âmbito do projeto referido acima foi o ensaio de absorção de água por capilaridade. Como já mencionado anteriormente neste ensaio observa-se a entrada de água no betão, e sabe-se que quanto menor for a sua entrada nos provetes, menores serão os poros existentes neste, e por consequência, maior será a proteção do betão aos agentes agressivos. O ensaio foi igualmente elaborado nos provetes de argamassas.

Aplicado o procedimento, seguem-se as medições e elaborada uma tabela com resultados. Para um dos tipos de provetes que foram ensaiados, o betão de referência CA750, obtiveram-se os resultados apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de absorção por capilaridade (adaptado de [75]).

Resultados	Mistura	0h	6h	12h	24h	48h	72h
Absorção de água por Capilaridade, Sa (kg/m <sup>2</sup> )	CA750	-	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4
	CA750_Si1%	-	0,9	1,1	1,2	1,4	1,6
	CA750_Si2%	-	1,0	1,2	1,3	1,5	1,5
	CA750_Al2%	-	1,1	1,3	1,6	1,8	2,0
	CA750_Zn1%	-	1,1	1,3	1,7	2,0	2,2

O parâmetro Sa caracteriza a absorção de água por capilaridade nas argamassas e nos betões. Quanto menor for este parâmetro, menor a absorção de água dos provetes, e por consequência melhores serão as argamassas e os betões. Neste ensaio, verifica-se que ao fim de 72h, os



provetes de betão com menor valor de  $S_a$  são os correspondentes à mistura CA750, que corresponde à mistura de referência, sem nano-partículas.

- **Carbonatação acelerada**

A carbonatação é um dos problemas mais comuns no betão, daí a existência de ensaios que permitam determinar a sua profundidade. Este ensaio laboratorial consistiu na preparação dos provetes, e na exposição dos mesmos a um ambiente que permitisse a carbonatação acelerada. A Figura 5.5 apresenta os provetes, antes e depois do ensaio de carbonatação acelerada. Depois da exposição os provetes foram borrifados com uma solução de fenolftaleína.



Figura 5.5 – Provetes de betão sujeitos ao ensaio de carbonatação acelerada [75].

Os resultados obtidos neste ensaio para o betão a que chamaram de CA750 encontram-se registados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Resultados do ensaio de carbonatação acelerada (adaptado de [75]).

Carbonatação acelerada CA750 a 5% de CO <sub>2</sub>				
Amostra	C28dias (mm)	C56dias (mm)	C90dias (mm)	C120dias (mm)
CA750	0,00	0,00	0,00	0,00
CA750_Si1%	0,00	0,43	0,00	1,25
CA750_Si2%	0,00	0,71	0,00	1,48
CA750_Al2%	0,00	0,00	0,00	0,00
CA750_Zn1%	3,75	3,79	4,64	6,79

Para este ensaio, pode verificar-se que os melhores resultados pertencem aos betões da mistura de referência e ao betão que contém nano-partículas de alumínio.

### 5.3 Casos reais de ensaios in situ

- **Em pontes**

De seguida apresentam-se alguns ensaios realizados numa ponte, sobre o rio Jaguari em São Paulo Brasil (Fig. 5.6), usados para caracterizar o estado da ponte: pormenorização das armaduras, resistência do betão e características relativas à durabilidade do betão [76].



Figura 5.6 - Ponte sobre o rio Jaguari [76].

- **Ensaio do Pacómetro**

O ensaio do pacómetro, Figura 5.7, foi usado para localizar as armaduras, saber o seu espaçamento e o recobrimento.



Figura 5.7 – Ensaio do pacómetro [76]

Na Figura 5.8 apresentam-se os resultados referentes à localização das armaduras.

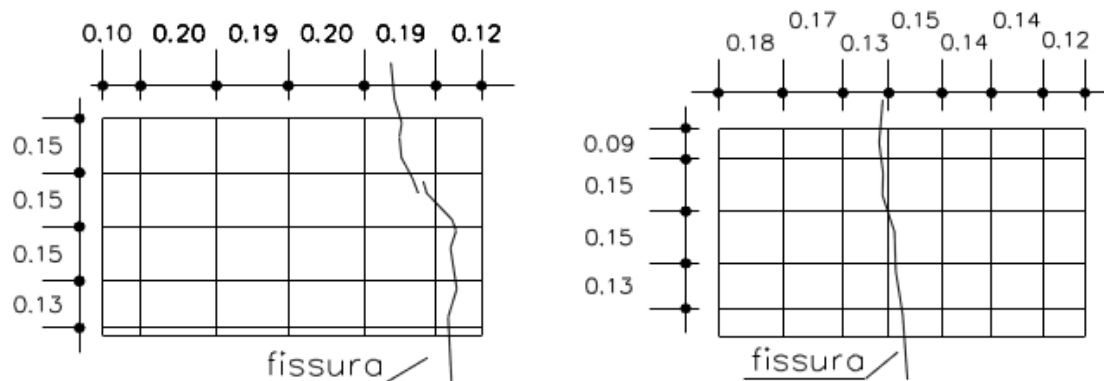


Figura 5.8 – Esquema com a localização das armaduras no ensaio do pacómetro (adaptado de [76]).

Para além da localização das armaduras, também determinaram o recobrimento das mesmas, que se apresenta na Tabela 5.7, representada a baixo.

Tabela 5.7 – Resultados do recobrimento das armaduras (adaptado de [76]).

Barras verticais	Zona 1 (cm)
B1	2,73
B2	2,54
B3	2,62
B4	2,55
B5	2,75
Média	2,64

#### ○ Ensaio do esclerómetro

O ensaio do esclerómetro foi também usado neste estudo para determinar a resistência do betão à compressão (Fig. 5.9).

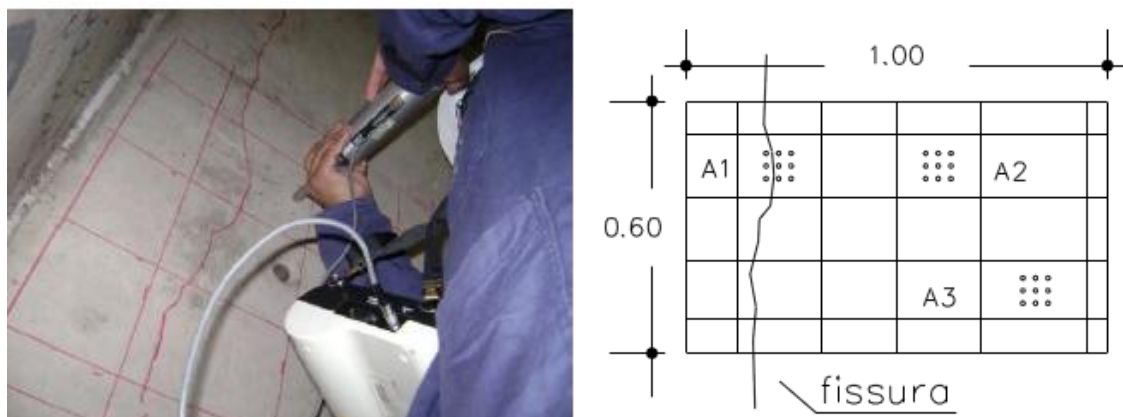


Figura 5.9 – Ensaio do esclerómetro e esquema com a localização dos pontos onde foram realizados os ensaios (adaptado de [76]).

Alguns dos resultados obtidos no ensaio encontram-se na Tabela 5.8. Verifica-se que o valor do índice esclerométrico é semelhante nos três locais de ensaio.

Tabela 5.8 – Resultados obtidos do ensaio do esclerómetro (adaptado de [76]).

Zona	Área	Índice Esclerométrico	Resistência à compressão estimada
		IE	$f_c$ (MPa)
<b>Z1</b>	A1	45,96	35,93
<b>Z1</b>	A2	45,20	34,90
<b>Z1</b>	A3	46,70	36,94

#### ○ Ensaio de Ultra sons

Mais um ensaio utilizado para a caracterização da ponte sobre o rio Jaguari, foi o de ultra sons. Neste ensaio mediram o tempo que ocorre entre a emissão de uma onda até à receção da mesma, e isso permitiu a caracterização dos elementos de betão, isto é, avaliar a sua qualidade [76]. Os procedimentos foram seguidos segundo as normas, como se pode observar na Figura 5.10.

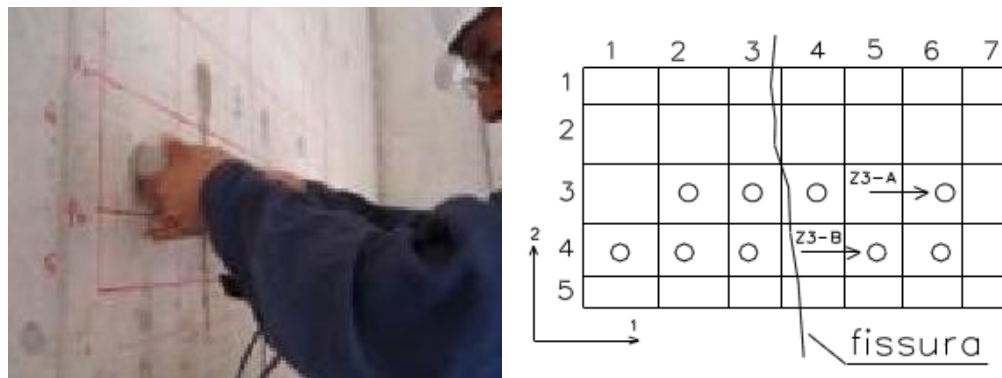


Figura 5.10 – Ensaio de ultra sons e diagrama exemplificativo do elemento ensaiado (adaptado de [76]).

Nesta zona de ensaio utilizaram o método indireto, devido à impossibilidade de se usar outro dos métodos. Alguns dos resultados obtidos neste ensaio encontram-se na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Resultados do ensaio de Ultra Sons (adaptado de [76]).

Zona	Medidas	Posição do emissor (E)	Posição do recetor (R)	Distância entre E e R (cm)	Tempo ( $\mu$ s)	Velocidade (m/s)
<b>Z1 - A</b>	1 A	21	22	15	76,6	4253,50
	2 A	21	23	30	83,26	
	3 A	21	24	45	134,5	
	4 A	21	25	75	204,6	

Verifica-se que, à medida que a distância entre o emissor e o recetor aumenta, aumenta também o tempo de chegada da onda. A Tabela 5.10 mostra o critério para a avaliação da qualidade do betão. Pela sua análise e pelo resultado obtido para a velocidade de propagação de onda pode concluir-se que o betão tem uma ótima qualidade.

Tabela 5.10 – Critérios de avaliação da qualidade do betão (adaptado de [76]).

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO LINEAR (M/S)	QUALIDADE DO BETÃO
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótimo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V < 2000$	Mau

### ○ Ensaio de Carbonatação in situ

Por último, foi realizado o ensaio de carbonatação. Realizaram as perfurações em locais devidamente escolhidos, procederam à sua limpeza e seguidamente borrifaram a cavidade com a solução de fenolftaleína. A Figura 5.11 mostra o resultado de um do ensaio num dos pontos [76].



Figura 5.11 – Resultado do ensaio de carbonatação (76)

Na Tabela 5.11 são apresentados os resultados referentes ao ensaio de carbonatação. Pode-se observar que os valores são bastante diferentes uns dos outros, o que revela a heterogeneidade do betão em análise. Verifica-se ainda, que os valores para a profundidade de carbonatação são bastante elevados, para uma estrutura com 8 anos de idade, aquando da realização dos ensaios [76].

Tabela 5.11 – Resultados do ensaio de carbonatação (adaptado de [76]).

Área	Profundidade Furo (mm)	$e_{CO_2min}$ (mm)	$e_{CO_2máx}$ (mm)	$e_{CO_2médio}$ (mm)
A1	37,00	9,50	12,60	11,05
A2	35,62	10,30	13,60	11,95
A3	33,55	5,89	11,36	8,63
A4	22,08	5,83	12,09	8,96
A5	70,00	13,41	14,01	13,71
A6	30,91	16,90	17,30	17,10
A7	29,80	8,20	11,51	9,86
A8	38,84	8,32	13,29	10,81
A9	31,25	10,10	15,15	12,63
A10	80,00	16,10	16,80	16,45
A11	67,00	13,70	13,93	13,82

- **Em edifícios**

Apresentam-se agora alguns ensaios realizados num edifício (Fig. 5.12), do tipo administrativo, que se encontra em estado devoluto, situado na cidade de Lisboa [77].

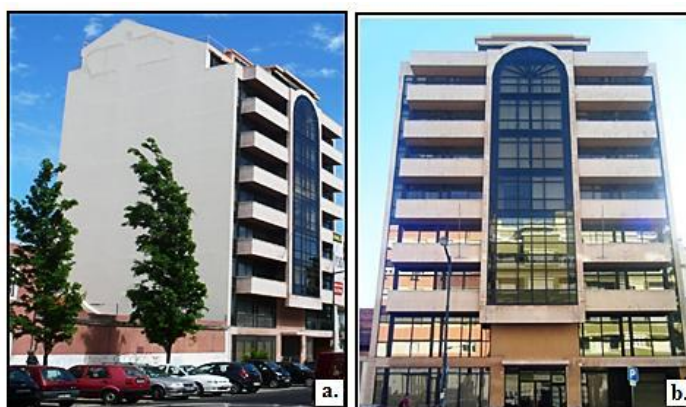


Figura 5.12 – Edifício em estado devoluto na cidade de Lisboa (adaptado de [77]).



### ○ Ensaio esclerométrico

O ensaio do esclerómetro (Fig. 5.13) foi utilizado para determinar a resistência do betão à compressão no elemento em estudo.



Figura 5.13 – Ensaio do esclerómetro. Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios (adaptado de [77]).

Alguns dos resultados obtidos encontram-se descritos na Tabela 5.12, onde se verifica que o valor do índice esclerométrico obtido no ensaio é semelhante nos pontos em análise, originando um valor médio de ressalto de 34,18. Este valor foi calculado pela expressão [77]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n Ri}{n} \times \frac{Rr}{Ra}$$

Em que,

R = Valor médio do número do ressalto (corrigido);

Ri = Número de ressalto do ensaio (sem correção);

n = Número de leituras;

Ra = Número de ressalto do esclerómetro;

Rr = Número do ressalto de referência.

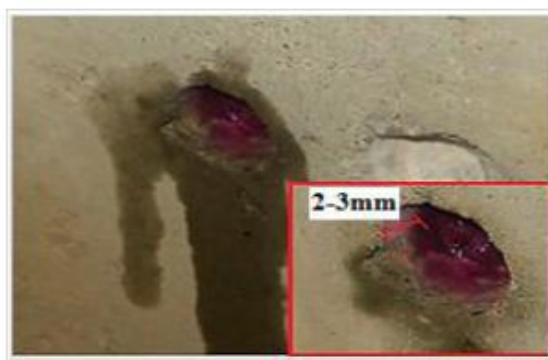


Tabela 5.12 – Resultados obtidos no ensaio do esclerómetro (adaptado de [77]).

Zonas	Valor do índice esclerométrico
2	34
3	34
4	33
6	33
9	35
10	33
13	35
14	32
20	32
25	33

○ **Ensaio de carbonatação *in situ***

Foi elaborado o ensaio para verificar a profundidade de carbonatação do betão (Fig.5.14). Os furos realizados para este ensaio tinham cerca de 1,5 cm de diâmetro e 1 cm de profundidade. Depois de borrifados com a solução de fenolftaleína, verificaram uma carbonatação do betão bastante superficial de cerca de 2 a 3 mm [77].

Figura 5.14 – Ensaio de carbonatação *in situ* [77].



## 6. CONCLUSÕES

### 6.1 Conclusões

Neste documento compilaram-se diversas informações acerca da ciência das patologias na área da Engenharia Civil. Numa primeira fase foram relatados os processos patológicos mais comuns, descreveram-se os agentes de degradação, a forma como estes atuam nas estruturas e os danos que provocam. Procurou-se apresentar de forma sistemática e organizada toda a panóplia de patologias que se podem encontrar nas edificações, pontes, aquedutos, ou seja, em todas as estruturas de betão. Também se analisou as causas possíveis relacionadas com essas mesmas patologias. Deve-se proceder a esta análise antes de se realizar a reparação, pois o conhecimento das causas do problema é fundamental para definir o plano de intervenção.

Posteriormente foram descritas as etapas necessárias para o técnico realizar uma boa avaliação do estado das estruturas de betão. Uma etapa fundamental neste processo de avaliação é a realização de ensaios para determinar certas características da estrutura. Procurou-se, resumidamente, apresentar e descrever os ensaios mais importantes usados na avaliação de estruturas de betão. Existem inúmeros ensaios cada um com um objetivo diferente e específico, e podem-se dividir em dois grandes grupos, os ensaios realizados *in situ* e os elaborados em laboratório. Independentemente do tipo ensaio, o objetivo subjacente a todos eles é caracterizar o estado da estrutura e das patologias. Juntamente com a descrição dos ensaios foram apresentadas as normas que devem ser respeitadas para a correta realização dos ensaios.

Por fim, de referir que, devido à ausência da componente prática/laboratorial nesta dissertação e como considerou-se importante apresentar casos com aplicações reais, houve necessidade de usar informações sobre ensaios que foram realizados no âmbito de outros trabalhos de estudo. Relativamente aos ensaios laboratoriais, foram apresentados alguns resultados de um trabalho de investigação na área das argamassas e betões com a adição de nano-partículas. Foram também apresentados resultados e ilustrações de ensaios *in situ*, realizados no âmbito de um trabalho de estudo sobre uma ponte localizada em São Paulo, Brasil e sobre um edifício devoluto na cidade de Lisboa.

### 6.2 Desenvolvimentos Futuros

No âmbito deste tema sugere-se para o futuro a realização dos seguintes trabalhos:

- Recolher informação que complemente o presente trabalho, nomeadamente, descrever as patologias e os ensaios que não foram referidos neste documento, não só nas estruturas de betão mas também noutro tipo de estruturas (madeira, metálicas e de alvenaria);

- 
- Desenvolver um trabalho prático onde seja possível aplicar as informações aqui apresentadas, nomeadamente, a realização de vários ensaios numa estrutura real. Com base nos dados recolhidos seria realizado um diagnóstico e definido um plano de intervenção.

Completar a informação apresentada nesta dissertação com a temática da reparação e reforço de estruturas de betão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lourenço, J., Júlio, E., Maranha, P.; 2004. Betões de Agregados Leves de Argila Expandida; Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, Lisboa.
- [2] Córias, Victor; Outubro 2006. Inspeções e Ensaio na Reabilitação de Edifícios; Instituto Superior Técnico; Lisboa.
- [3] Zortea – Premoldados – Viga (consultado em 10 de Outubro de 2016) <http://www.premoldadoszortea.com.br/produtos/vigas/5>
- [4] Padrão, José Avelino Loureiro Moreira; Setembro 2004. “Técnicas de Inspeção e Diagnóstico em Estruturas”, MEST, FEUP, Porto.
- [5] DreamStime – Fungo na Parede (consultado em 10 de Outubro de 2016) <https://pt.dreamstime.com/photos-images/fungo-na-parede.html>
- [6] ANoticia – “Aprenda como Prevenir o Mofo e Prevenir Doenças Respiratórias” (consultado em 10 de Outubro de 2016) <http://anoticia.clicrbs.com.br/sc/geral/noticia/2014/07/aprenda-como-evitar-o-mofo-e-prevenir-doencas-respiratorias-4560044.html>
- [7] Sousa, Álvaro Fernando Vieira da Silva; Setembro de 2008. “Reparação, Reabilitação e Reforço de Estruturas de Betão Armado”. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto, Porto
- [8] Costa, António; Ano 2011/12. “Reabilitação e Reforço de Estruturas”. Aula 7.1: Corrosão do aço e deterioração do betão; Mestrado em Engenharia – Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [9] Casa&Construção – “Como Acabar com a Umidade das Paredes?” (consultado em 11 de Outubro de 2016) <http://www.cecorienta.com.br/perguntas/como-acabar-com-a-umidade-das-paredes/61#>
- [10] NORTSECO - Tratamientos Antihumedad – “Humedad por capilaridad” (consultado em 11 de Outubro de 2016) <http://nortseco.es/humedad-capilar.php>
- [11] Isolamento Térmico – “Forum Isolamento Térmico” (consultado em 11 de Outubro de 2016) <http://isolamentotermico.blogs.sapo.pt/>
- [12] Beleza, Luís de Fátima Teixeira; Setembro 1996. “A Reparação de Betões”. Dissertação para obtenção do grau de Licenciado – Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto
- [13] Construções Lotus – Construção e Reabilitação (consultado em 12 de Outubro de 2016) <http://www.obraslotus.pt/reforco-de-estrutura/>

- [14] Gonçalves, Eduardo Albuquerque Buys; Agosto 2015. “Estudo de Patologias e suas Causas nas Estruturas de Concreto Armado de Obras de Edificações”. Universidade Federal do Rio de Janeiro; Rio de Janeiro; Brasil.
- [15] DENNYS SAMPAIO – “Corrosão Armaduras de Aço” (consultado em 14 de Outubro de 2016)  
<http://dennysfs.blogspot.pt/2011/09/dh6x1ysnkvmtnawvb38ugiaaaaaaadjm9jyqcq.html>
- [16] Silva, Joana Monteiro Marques Ferreira da; Setembro 2007. “Métodos Electroquímicos para Prevenção da Deterioração e Reparação de Estruturas de Betão Armado – Proteção Catódica, Dessalinização e Realcalinização”; Dissertação para grau de Mestre em Engenharia Civil; Instituto Superior Técnico; Universidade Técnica de Lisboa; Lisboa.
- [17] Silva, Pedro Neto Roberto; “As estruturas falam! (“Faces” da Eflorescência)” (consultado em 17 de Outubro de 2016) <https://www.linkedin.com/pulse/estruturas-falam-faces-da-efloresc%C3%Aancia-pedro-neto-roberto-silva>
- [18] Mundodatinta – “Salitre – Eflorescências e Criptoflorescências – parte 1” (consultado em 18 de Outubro de 2016) <https://mundodatinta.wordpress.com/2011/02/06/salitre-eflorescencias-e-criptoflorescencias-parte1/>
- [19] Propriedades do Concreto – “Fissuras em Lajes: Sintomas parecidos, doenças diferentes” (consultado em 19 de Outubro de 2016)  
<http://propriedadesdoconcreto.blogspot.pt/2012/10/fissuras-em-lajes-sintomas-parecidos.html>
- [20] Moura, Daniela da Silveira; Outubro 2012. “Deterioração e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado”. Mestrado em Tecnologias e Gestão das Construções; Instituto Superior de Engenharia do Porto; Instituto Politécnico do Porto; Porto
- [21] Carmo, Ricardo Nuno Francisco do; 2007. “Protecção, reabilitação e reparação de estruturas”; Aulas de Betão Armado; Instituto Superior de Engenharia de Coimbra; Coimbra.
- [22] Lourenço, Mychael V. C.; 2009. “Parâmetros de Avaliação de Patologias em Obras de Arte Especiais”; Universidade Federal Fluminense – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil; Niterói; Rio de Janeiro; Brasil.
- [23] Tutikian, Bernardo; Pacheco, Marcelo; 2013. “Inspección, Diagnóstico y Prognóstico en la Construcción Civil”; Boletín Técnico; Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – ALCONPAT Int; Unisinos; Brasil
- [24] Brito, J., 2009. Sistemas de Inspeção e Diagnóstico em Edifícios. Actas do 3º Encontro sobre patologia e reabilitação de edifícios, PATORREB.
- [25] Guidebook on non-destructive testing of concrete structures; 2002; International Atomic Energy Agency, Vienna
- [26] Nicholas J. Carino, 23 June, 2010; Nondestructive and in place; the methods to evaluate concrete structures; Special Sessions on Inspection and Diagnostics of Structures; REABILITAR 2010; National Laboratory of Civil Engineering (LNEC); Lisbon, Portugal

- [27] Dynamis Techne, “Tecnologia em engenharia de estruturas e fundações” (consultado em 1 de Dezembro de 2016) <https://dynamistechne.com/>
- [28] Evangelista, Ana Catarina Jorge; Junho 2012. “Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos”. Dissertação para obtenção do grau de doutor em Ciências da Engenharia Civil; Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE; Rio de Janeiro; Brasil.
- [29] Techcon – Engenharia e Consultoria – “Teste de carga em estruturas, fundações e equipamentos” (consultado em 1 de Dezembro de 2016) <http://techcon.eng.br/teste-de-carga/>
- [30] SlideShare – “Detecção de Dano com Ultrasons em Elementos de Betão Estrutural” (consultado em 1 de Dezembro de 2016) <http://pt.slideshare.net/joaorio1/rio-2012-be2012-24540832>
- [31] Marecos, Vânia; Antunes, Maria de Lurdes; Fontul, Simona. Avaliação da Estrutura de uma Pista de Betão Pré-Esforçado com Radar de Prospeção; Lanoratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Transportes; Lisboa.
- [32] NCREP – Consultoria em reabilitação do edificado e património – “Rua do Almada, Porto” (consultado em 1 de Dezembro de 2016) <http://www.ncrep.pt/view.php?id=14327>
- [33] DEMOBETÃO – “Carotagem” (consultado em 1 de Dezembro de 2016) [http://demobetao.pt/?page\\_id=381](http://demobetao.pt/?page_id=381)
- [34] Flores-Colen, I. & Brito, J.; 2012. Ciência e Engenharia de Materiais de Construção (Rebocos). Lisboa: IST PRESS,
- [35] Flores-Colen, I. & Brito, J. A influência de alguns parâmetros na fiabilidade de estratégias de manutenção em edifícios correntes. 3º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios (Tema III: Parque Edificado Recente). LNEC, Lisboa, 2003: 1017 – 1025.
- [36] Flores-Colen, I.; 2008. “Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva”. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [37] Ferreira, J.;2010. “Técnicas de diagnóstico de patologias em edifícios”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Faculdade do Porto.
- [38] Correia, Sérgio Filipe Ramos; Dezembro 2014. “Catálogo de Técnicas de Diagnóstico em Elementos Estruturais de Edifícios Correntes em Betão Armado”. Dissertação para a obtenção de Grau de Mestre; Academia Militar; Instituto Superior Técnico; Lisboa.
- [39] Téchné – “Métodos de Ensaios Não Destrutivos para Estruturas de Concreto” (consultado em 9 de Novembro de 2016) <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/151/artigo-metodos-de-ensaios-nao-destrutivos-para-estruturas-de-286643-1.aspx>
- [40] Nepomuceno, M.;1999. Ensaios não-destrutivos em betão. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica. Trabalho de síntese, Universidade da Beira Interior.
- [41] DAGA – Comercial de Ingenieria “Esclerómetro SCHMIDT” (consultado em 9 de Novembro de 2016) <http://www.dagasl.es/art2.htm>

- [42] Progenie Engineering – “Ensaio Esclerométrico” (consultado em 9 de Novembro de 2016) <http://www.progenie-engineering.com/wp-content/uploads/2015/01/FT14.pdf?fd40fd>
- [43] 8controletecnologico – “Ensaio de Resistência da Peça Concretada – Esclerometria” (consultado em 9 de Novembro de 2016) <http://www.8controletecnologico.com/ensaios1/if0rr4zl29/ENSAIO-DE-RESIST%C3%80NCIA-DA-PE%C3%87A-CONCRETADA-ESCLEROMETRIA>
- [44] Central Projectos – Consultores de Projecto – “Laboratório de Estruturas Central Projectos esteve numa Escola de Coimbra” (consultado em 9 de Novembro de 2016) <http://www.centralprojectos.pt/conteudos/blog/show.aspx?idcont=603&title=laboratorio-de-estruturas-central-projectos-esteve-numa-escola-de-coimbra&idioma=pt>
- [45] OZ. Diagnóstico e levantamento e controlo de qualidade em estruturas e fundações, Lda. <http://www.oz-diagnostico.pt/> (Consultado em Novembro de 2016)
- [46] Sampaio, Célia Manuela Costa Pereira; 2010. “Caracterização do betão através de técnicas não-destrutivas”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [47] FACRORELEVANTE – Engenharia e Sistemas, Lda (consultado em 9 de Novembro de 2016) <http://factorelevante.vetorpolaridade.pt/analiseUltraSons.html>
- [48] Gonçalves, A.; 2010. “Estudo da influência dos factores de aplicação no desempenho de argamassas de revestimento recorrendo a técnicas de ensaio in-situ”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [49] Galvão, J.; 2009. “Técnicas de ensaio in-situ para avaliação do comportamento mecânico de rebocos em fachadas - Esclerómetro e ultra-sons”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico; Lisboa.
- [50] J.ROMA, Lda – “Teste por Ultra Sons” (consultado em 9 de Novembro de 2016) <http://www.jroma.pt/instrumentaccedilatildeo-para-teste-de-estruturas.html>
- [51] Alibaba.com – Global Trade starts here. “Equipamentos de Teste – Impacto eco images” (consultado em 12 de Novembro de 2016) <http://portuguese.alibaba.com/photo-products/impact-echo-images.html>
- [52] OZ. Diagnóstico e levantamento e controlo de qualidade em estruturas e fundações, Lda. [www.oz-diagnostico.pt/\\_pt/docs/parte\\_III\\_tecnicas.doc](http://www.oz-diagnostico.pt/_pt/docs/parte_III_tecnicas.doc) (Consultado em Novembro de 2016)
- [53] INTEMAC – “Impacto – Eco” (consultado em 12 de Novembro de 2016) [http://www.intemac.es/?intemac\\_servicio=impacto-eco](http://www.intemac.es/?intemac_servicio=impacto-eco)
- [54] MAQUESONDA – “KIT PARA ENSAIO DE PERMEABILIDADE APARENTE DO BETÃO AO AR E ÁGUA” (consultado em 12 de Novembro de 2016) <http://www.matest.pt/betatildeo.html>
- [55] Appleton, J. & Costa.; 1999. A. Análise da Penetração de Cloretos em Estruturas de Betão Armado Expostas ao Ambiente Marítimo. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas.



- [56] Lage, João Ricardo Martins; Outubro 2013. “Estudo da Influência da Amostragem e da Metodologia de Colheita de Betão em Pó para a Determinação do Teor de Cloretos”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre; Instituto Superior Técnico; Lisboa.
- [57] Progenie Engineering; Janeiro 2015. Detecção e Caracterização de Armaduras e Avaliação do seu Recobrimento. Código FT.03.00
- <http://www.progenie-engineering.com/wp-content/uploads/2015/01/FT31.pdf?fd40fd>.  
(Consultado em Novembro de 2016)
- [58] Amazon. Es – “Escáner al tuntún GOWE, clavos Detector pacómetro, localizador acero corrugado para hormigón” (consultado em 14 de Novembro de 2016)  
<https://www.amazon.es/Detector-pac%C3%B3metro-localizador-corrugado-hormig%C3%B3n/dp/B00ROSR40A>
- [59] NCR EP – “Levantamento de Armaduras e Avaliação do seu Diâmetro e Recobrimento” (consultado em 14 de Novembro de 2016) <http://www.ncrep.pt/section.php?id=1439>
- [60] Gouveia, João Carlos Mateus; Janeiro 2010. “Degradação do Betão por Fenómenos de Carbonatação: Consequências nas Armaduras das Edificações após anos 50 na Cidade Lisboa”; Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil; Departamento de Engenharia Civil; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa; Lisboa.
- [61] Sielo Portugal – “Corrosão e Protecção de Materiais” (consultado em 14 de Novembro de 2016) [http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0870-11642012000200002](http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-11642012000200002)
- [62] SPY Building – Inspeção de Edifícios – “Ensaio de Carbonatação” (consultado em 14 de Novembro de 2016) <http://www.spybuilding.com/index.php?id1=3&id2=1>
- [63] LONG, A. E.; MURRAY, A.; 1984. The Pull-off Partially Destructive Test for Concrete, in: In-situ Non-destructive Testing of Concrete, SP-82, Detroit, American Concrete Institute.
- [64] Lopes, Ana Catarina Antunes; Outubro 2012. “Avaliação da Variabilidade da Técnica de Ensaio Pull –Off na Medição da Resistência de Aderência à Tracção em Revestimentos de Ladrilhos Cerâmicos e Argamassas”; Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil; Instituto Superior Técnico; Universidade Técnica de Lisboa; Lisboa.
- [65] CASTRO, A. L.; ÂNGULO, S. C; BILESKY, P. C; SANTOS, R. F. C. ; HAMASSAKI, L. T. ; SILVA, E.; 2009. Métodos de ensaios não destrutivos para estruturas de concreto. Revista de Tecnologia da Construção - Técnica (São Paulo), v. 17, pp. 56-60.
- [66] Sielo Portugal – “Ensaio de “Pull Off” para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil” (consultado em 15 de Novembro de 2016) [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1983-41952012000600003&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1983-41952012000600003&script=sci_arttext&tlng=pt)
- [67] Pertangola – “Pull\_off\_Tester” (consultado em 15 de Novembro de 2016)  
<http://pertangola.com/produtos/proceq/>

- [68] Carvalho, Patrícia Nogueira de; Julho 2010. “Medição do teor de Humidade em Materiais de Construção”, Dissertação para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [69] LNEC, Março 2008. Metodologia de Diagnóstico de Anomalias devidas à Humidade em Paredes Antigas, Relatório 115, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [70] Manutenção & Suprimentos – “Medidor de umidade de concreto” (consultado em 15 de Novembro de 2016) <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/6519-medidor-de-umidade-de-concreto/>
- [71] Bungey, J. H., Millard, S. G.; e Grantham, M.G.; 2006. Testing of Concrete in Structures. Taylor and Francis, 4th Edition.
- [72] Mendes, Nuno Miguel dos Santos; Dezembro 2012. “Avaliação do Ensaio de Pull – Out na Estimativa da Resistência à Compressão do Betão em Idades Jovens”; Dissertação para a Obtenção de Grau de Mestre; Faculdade de Ciências e Tecnologia; Universidade Nova de Lisboa; Lisboa.
- [73] J.ROMA, Lda – “Sistema Digital de Arrancamento do Tipo Pull-Out” (consultado em 15 de Novembro de 2016) <http://www.jroma.pt/aderencia.html>
- [74] PETERSEN, C.G.; March 1990. In-place Testing for Quality Assurance and Early Loading Operations With Pull-Out Testing and Maturity Measurements. Testing During Concrete Construction, RILEM, International Workshop.
- [75] Carmo, Ricardo; Costa, Hugo; Lourenço, Cátia; Soldado, Eliana; Junho de 2015. “Projecto Nanobetão n38702 – Desenvolvimento de um betão de desempenho melhorado”, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra.
- [76] Sahuinco, Melquiades Hermógenes Choquepuma, 2011. “Utilização de métodos não destrutivos e semi destrutivos na avaliação de pontes de concreto” Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, São Paulo, Brasil.
- [77] Amaral, Sara Filipa Milho; Dezembro de 2013. “Inspeção e diagnóstico de edifícios recentes. Estudo de um caso real”, Trabalho de projecto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

## REFERÊNCIAS NORMATIVAS

NP EN 12390 – Ensaaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes.

NP EN 12390 - Ensaaios do betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão de provetes

NP EN 12504 – Ensaio de betão nas estruturas – Parte 2: Ensaio não destrutivo. Determinação do índice esclerométrico. IPQ: Instituto Português da Qualidade, 2012.

NP EN 12504 – Ensaio de betão nas estruturas – Parte 4: Ensaio não destrutivo. Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. IPQ: Instituto Português da Qualidade, 2007.

NP EN 206-1:2007 – Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.

E 391 do LNEC – Betões. Determinação da resistência à carbonatação. Lisboa, 1993

E 393 do LNEC – Betões. Determinação da absorção da água por capilaridade.